

## Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-15-0031**

**Tranzistory s InN-kanálom pre THz mikrovlny a logiku**

Zodpovedný riešiteľ **Ing. Ján Kuzmík, DrSc.**

Príjemca **Elektrotechnický ústav SAV**

### Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Elektrotechnický ústav SAV  
Dúbravska cesta 9  
841 04 Bratislava  
Medzinárodné laserové centrum  
Ilkovičova 3  
841 04 Bratislava

### Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

1. University of Crete, Grécko.
2. University of Bristol, Veľká Británia
3. Caen University, Francúzsko
4. Hokkaido University, Japonsko
5. Hungarian Academy of Sciences, Maďarsko

### Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Vertical GaN transistor with insulating channel and the method of forming the same, PCT prihláška no.PCT/SK2018/000009.

### Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

1. Kuzmík, J., Fleury, C., Adikimenakis, A., Gregušová, D., Ťapajna, M., Dobročka, E., Haščík, Š., Kučera, M., Kúdela, R., Androulidaki, M., Pogany, D., Georgakilas, A., : Current conduction mechanism and electrical break-down in InN grown on GaN. Applied Phys. Lett. 110 (2017) 232103.
2. Ťapajna, M., Stoklas, R., Gregušová, D., Gucmann, F., Hušeková, K., Haščík, Š., Fröhlich, K., Tóth, L., Pecz, B., Brunner, F., Kuzmík, J., : Investigation of 'surface donors' in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructures: Correlation of electrical, structural, and chemical properties. Applied Surface Sci 426 (2017) 656-661.
3. Gregušová, D., Blaho, M., Haščík, Š., Šichman, P., Laurenčíková, A., Seifertová, A., Dérer, J., Brunner, F., Würfl, H., Kuzmík, J., : Polarization-engineered n+GaIn/GaN/AlGaIn/GaN normally-off MOS HEMTs. Physica Status Solidi a 214 (2017) 1700407.
4. Dobročka, E., Hasenöhrl, S., Chauhan, P., and Kuzmík, J.: Non-conventional scans in high-resolution X-ray diffraction analysis of epitaxial systems, Applied Surface Sci 461 (2018) 23-32.

5. Guemann, F., Ľapajna, M., Pohorelec, O., Haščík, Š., Hušeková, K., and Kuzmík, J.: Creation of two-dimensional electron gas and role of surface donors in III-N metal-oxide-semiconductor high-electron mobility transistors, *Phys. Status Solidi A* 215 (2018) 1800090.
6. Chauhan, P., Hasenöhrl, S., Dobročka, E., Chauvat, M.-P., Minj, A., Guemann, F., Vančo, Ľ., Kováč, J., Kret, S., Ruterana, P., Kuball, M., Šiffalovič, P., and Kuzmík, J.: Evidence of relationship between strain and In-incorporation: growth of N-polar In-rich InAlN buffer layer by OMCVD, *J. Applied Phys.* 125 (2019) 105304.
7. Ľapajna, M., Drobný, J., Guemann, F., Hušeková, K., Gregušová, D., Hashizume, T., and Kuzmík, J.: Impact of oxide/barrier charge on threshold voltage instabilities in AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructures, *Mater. Sci in Semicond Process.* 91 (2019) 356-361.
8. Chauhan, P., Hasenöhrl, S., Dobročka, E., Vančo Ľ., Stoklas, R., Kováč, J., Šiffalovič, P., and Kuzmík, J.: Effect of temperature and carrier gas on the properties of thick In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N layer, *Applied Surface Sci* 470 (2019) 1-7.
9. Hasenöhrl, S., Chauhan, P., Dobročka, E., Stoklas, R., Vančo, Ľ., Veselý, M., Bouazzaoui, F., Chauvat, M.-P., Reterana, P., and Kuzmík, J.: Generation of hole gas in non-inverted InAl(Ga)N/GaN heterostructures, *Applied Phys. Express* 12 (2019) 014001.
10. Kučera, M., Adikimenakis, A., Dobročka, E., Kúdela, R., Ľapajna, M., Laurenčíková, A., Georgakilas, A., and Kuzmík, J.: Structural, electrical, and optical properties of annealed InN films grown on sapphire and silicon substrates, *Thin Solid Films* 672 (2019) 114-119.
11. Gregušová, D., Tóth, L., Pohorelec, O., Hasenöhrl, S., Haščík, Š., Cora, I., Fogarassy, Z., Stoklas, R., Seifertova, A., Blaho, M., Laurenčíková, A., Oyobiki, T., Pécz, B., Hashizume, T., and Kuzmík, J.: InGaIn/(GaN)/AlGaIn/GaN normally-off metal-oxide-semiconductor high-electron mobility transistors with etched access region, *Jap. J. Applied Phys.* 58, SCCD21-5 (2019).

### **Uplatnenie výsledkov projektu**

InN je polovodičový materiál s najvyššou teoretickou driftovou rýchlosťou elektrónov (vd) spomedzi všetkých známych polovodičov. Takže návrh tranzistorov typu HEMT s napnutým InN kanálom narasteným na InAlN nárazníkovej vrstve predstavuje tú najlepšiu možnosť ktorú príroda môže ponúknuť v oblasti rýchlej elektroniky. Avšak v dôsledku nevyzretosti súčasných techník rastu heteroštruktúr na báze InN, doteraz neexistuje demonštrácia takýchto mikrovlnných súčiastok. Výsledkom projektu je získanie vedeckých poznatkov a expertízy rastu polovodičov pre novú triedu elektronických súčiastok na báze InN. Hlavnou výzvou projektu bolo pochopiť mechanizmus a vyvinúť prípravu InAlN vrstiev s vysokým obsahom In ako aj samotnej InN/InAlN heteroštruktúry, študovať a vysvetliť elektrochemické vlastnosti takýchto vysoko polárnych štruktúr a rozhraní pre nový typ tranzistorov. Výsledky projektu povedú k novým typom tranzistorov s aplikáciami v tuholátkových zosilňovačoch v THz pásme, k emisiám a detekciám mikrovln ako aj k post CMOS obvodom.

### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)**

1. Vyvinuli sme pôvodný postup rastu depozíciou z metal-organických pár (MOCVD) InAlN nárazníkovej vrstvy s vysokým obsahom In. Zistili sme, že kľúčovým aspektom efektívneho zabudovania In je relaxácia vrstvy. Priamym MOCVD rastom na zařírovej podložke bez použitia GaN medzivrstvy sme dosiahli InAlN vrstvu s In molárnym podielom 0.6 a N-polaritou. Zistili sme, že dodatočná akceptorová dotácia bude potrebná pre zabezpečenie semi-izolačného stavu.
2. V spolupráci s Univerzitou Kréta sme ako prví priamo testovali driftovú rýchlosť elektrónov v objemovom InN materiáli narastenom technikou molekulárnej vzázkovej epitaxie (MBE). Demonštrovali sme veľmi sľubnú hodnotu  $vd > 2.5 \times 10^5$  m/s, pričom pohyblivosť bola  $> 1000$  cm<sup>2</sup>/Vs. Poukázali sme na možnosť dosiahnutia ešte vyšších rýchlostí, nakoľko sme pozorovali elektrický prieraz materiálu ešte pred samotnou saturáciou vd. Predpokladáme, že je potrebné znížiť hustotu dislokácií v InN ktorá bola okolo  $5.6 \times 10^{10}$  cm<sup>-2</sup>. InN MBE vrstvy narastené na Univerzite Kréta sme testovali z hľadiska teplotnej stability, ako hraničným sa ukázalo žihanie pri 450 C.
3. Testovali sme MBE rast tenkej, zrejme napnutej InN vrstvy na InAlN nárazníkovej vrstve pripravenej MOCVD, ako aj následnú prípravu tranzistorových štruktúr. Potvrdil sa vznik vodivého kanála, avšak neoptimalizovaná oxidová vrstva pod hradlom neumožnila

demonštrovať funkčnosť tranzistorov. Na druhej strane sme pripravili tranzistory GaN/InN/GaN, ktorých prúd bol značne limitovaný relaxáciou InN. Potvrdila sa teda nutnosť použitia InAlN nárazníkovej vrstvy pre vyššie prúdové hustoty. V závere projektu sme ako prví na svete demonštrovali kontinuálny MOCVD rast InN na InAlN podložke.

4. Vyšetrovali sme vznik dvojrozmerného elektrónového plynu v kvantovej jame tvorenej vysoko polárnymi III-N vrstvami. Zistili sme, že na zaplnenie kanála nie je potrebná prítomnosť tzv. povrchových donorov, ale postačí injekcia elektrónov z kontaktov. Zistili sme, že stavy na rozhraní oxid/polovodič ktoré určujú stabilitu tranzistorov sú dôležité hlavne pre normálne zatvorený mód.

5. Pripravili sme kompletne napnuté InGaN/AlGaN/GaN heteroštruktúry, ktoré v závislosti od procesných krokov umožnili demonštrovať normálne zatvorené aj otvorené tranzistory na identickej epitaxnej vrstve.

6. Za neplánovaný, ale dôležitý výsledok projektu možno považovať demonštráciu dierového plynu na rozhraní InAlN/GaN bez nutnosti vytvorenia parazitného elektrónového plynu. Tento jav sme teoreticky popísali a môže viesť k príprave novej generácie CMOS obvodov na báze III-N polovodičov.

### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)**

1. A new method of the metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD) of the In-rich InAlN buffer layer has been developed. Relaxation of the layer has been found to be a key aspect for effective In incorporation. A direct MOCVD growth on sapphire without using GaN interlayer lead to InAlN with In molar ratio of 0.6 and N-polarity. We have found that an additional acceptor doping will be necessary for achieving layer semi-insulating performance.

2. In collaboration with University of Crete, for the first time we directly tested electron drift velocity in semi-bulk InN material grown by molecular-beam epitaxy (MBE). We demonstrated a promising  $v_d > 2.5 \times 10^5$  m/s, while the mobility was  $> 1000$  cm<sup>2</sup>/Vs. We pointed on possibility of even higher speed because of appearance of the pre-mature electrical breakdown of the material before  $v_d$  saturation could appear. Dislocations may relate to the breakdown. Consequently, the density of dislocation which is currently about  $5.6 \times 10^{10}$  cm<sup>-2</sup> has to be reduced. InN layers grown by MBE at U. Crete were tested for thermal stability, annealing at 450 C has been shown to be critical.

3. We tested MBE growth of a thin, assumingly strained InN layer on MOCVD-grown InAlN buffer layer, and related transistor processing. Creation of a conductive channel has been confirmed, however non-optimised oxide layer under the gate prevented transistor functionality. On the other hand we successfully processed GaN/InN/GaN transistors where however, the current density was severely limited due to InN relaxation. Consequently, a necessity of using InAlN buffer layer for achieving higher current density has been confirmed. By the end of the project, as a first in the world, we demonstrated continuous MOCVD growth of InN on InAlN layer.

4. We studied generation of the two-dimensional electron gas in highly polar III-N quantum wells. We have found that a population of the channel is not conditioned by the presence so-called surface donors, but can happen due to electron injection from the contact. We have found that states at the semiconductor/oxide interface which determine transistor stability are crucial particularly for the normally-off operational mode.

5. We have prepared completely strained MOCVD-grown InGaN/AlGaN/GaN heterostructures, which depending on processing steps, facilitated preparation of the both of normally-on and -off transistors on the identical epitaxial layer.

6. Not planned but important outcome of the project is demonstration of a hole gas at the InAlN/GaN interface without necessity of having a parasitic electron gas. This phenomenon was theoretically described by us and in future may lead to a new generation of III-N based CMOS circuits.