

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

307 942

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

H01L 29/201 (2006.01)

H01L 29/207 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2018-295**
(22) Přihlášeno: **15.06.2018**
(40) Zveřejněno: **04.09.2019**
(Věstník č. 36/2019)
(47) Uděleno: **25.07.2019**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **04.09.2019**
(Věstník č. 36/2019)

(56) Relevantní dokumenty:

Giuseppe Greco, Ferdinando Iucolano, Fabrizio Roccaforte: Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate, Materials Science in Semiconductor Processing 78 (2018), pages 96–106, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2017.09.027>, Available online 05 October 2017 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369800117316554>.
US 2010258841 A; US 2018083133 A.

(73) Majitel patentu:

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Praha 8, Libeň, CZ

(72) Původce:

Ing. Alice Hospodková, Ph.D., Praha 6, Střešovice, CZ

Ing. Filip Dominec, Ph.D., Praha 6, Střešovice, CZ

(74) Zástupce:

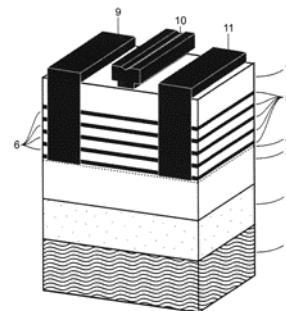
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i./CITT, Karel Bauer,
Za Radnicí 835, 252 41 Dolní Břežany

(54) Název vynálezu:

Epitaxní vícevrstvá struktura pro tranzistory s vysokou pohyblivostí elektronů na bázi GaN a tranzistor obsahující tuto strukturu

(57) Anotace:

Epitaxní vícevrstvá polovodičová struktura vhodná pro využití v nitridových e-HEMT strukturách, která má vrstvu (3) s elektronovým kanálem (4), sestávající z nedotovaného GaN, nad níž je bariérová vrstva přiléhající k elektronovému kanálu (4). Bariérová vrstva je podle vynálezu tvořena kombinací vrstev (5, 6) binárních polovodičů AlN a GaN. Binární polovodiče a rozhraní mezi nimi tvoří účinnou bariéru zejména pro zpětnou difúzi Mg atomů z GaN krycí vrstvy do elektronového kanálu (4). Bariérová struktura přiléhá k elektronovému kanálu (4) vždy AlN vrstvou (5), avšak seshora může být ukončena jak GaN vrstvou (6), tak vrstvou (5) AlN. Bariéra může obsahovat jedinou nebo více dvojic GaN/AlN, může mít větší tloušťku než klasické bariéry tvořené AlGaIn vrstvou. Několik horních GaN vrstev (6) může být dotováno hořčíkem. Epitaxní vícevrstvá polovodičová struktura podle vynálezu je vhodná zejména pro tranzistor s elektronovým kanálem, který je bez přiloženého napětí zavřený.



CZ 307942 B6

Epitaxní vícevrstvá struktura pro tranzistory s vysokou pohyblivostí elektronů na bázi GaN a tranzistor obsahující tuto strukturu

5 Oblast techniky

Vynález se týká polovodičových tranzistorových struktur s vysokou vodivostí elektronového kanálu založených na nitridových polovodičích, konkrétněji epitaxních vícevrstevných struktur, které mají vrstvu s elektronovým kanálem, sestávající z nedopovaného GaN, nad níž je bariérová
10 vrstva, v tranzistorech s vysokou pohyblivostí elektronů. Vynález se dále týká tranzistoru s vysokou pohyblivostí elektronů obsahujícího tuto strukturu, konkrétněji tranzistoru s elektronovým kanálem, který je bez přiloženého napětí zavřený.

15 Dosavadní stav techniky

Základem uvedených polovodičových struktur jsou zejména nitrid galitý GaN, nitrid hlinitý AlN a směsný nitrid hliníku a galia AlGaN.

20 Tranzistory s vysokou pohyblivostí elektronů, označované obvykle jako HEMT (High Electron Mobility Transistors) nebo e-HEMT (Enhancement High. Electron Mobility Transistor) na bázi GaN se používají pro četné aplikace. Jak je známo například z článku K. J. Chen and Ch. Zhou, Phys. Status Solidi A 208, 434 (2011), AlGaN/GaN heterostruktury se širokým zakázaným
25 pásem jsou široce využívány pro vysokovýkonové a vysokofrekvenční tranzistory díky vysoké saturační rychlosti elektronů 2.5×10^7 cm/s, vysoké napěťové odolnosti vůči průrazu (kritické elektrické pole pro průraz je v těchto polovodičích 3.3 MV/cm) a vysoké plošné hustotě náboje v elektronovém kanálu v řádu 10^{13} cm⁻², která se vytvoří díky silnému polarizačnímu poli na rozhraní AlGaN/GaN.

30 Tyto struktury připravené s orientací c- (0001) terminace povrchu Ga atomy, však vytváří elektronový kanál, který je otevřený (ve vodivém stavu) i bez přiloženého vnějšího napětí, jedná se o tzv. d-mode HEMT strukturu. Pro elektronické aplikace je však mnohem výhodnější a žádanější tranzistorová struktura se zavřeným elektronovým kanálem bez přiloženého napětí, tzv. normally off, nebo e-HEMT struktura. Normálně zavřený kanál tranzistoru pomáhá snížit
35 spotřebu a zvýšit bezpečnost elektrických obvodů s těmito tranzistory.

V průmyslu nejčastěji používaným způsobem je p-typová dotace GaN (to znamená legování neboli dotování krystalové mřížky prvkem s menším počtem valenčních elektronů, který propůjčuje vodivost p-typu, kdy nositeli náboje jsou „díry“), oblasti mezi bariérou a hradlem,
40 jejíž struktura je schematicky zobrazena na Obr. 1(a), popsána například v N. Tsuyukuchi, K. Nagamatsu, Y. Hirose, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 45, L319 (2006). Použití Mg atomů pro vytvoření p-typové GaN vrstvy pod hradlem má své nevýhody. Mg atomy je vhodné umístit těsně k AlGaN bariérové vrstvě, aby p-typová dotace byla co nejúčinnější. Součástí obsahující Mg je však nutné také žíhat v dusíkové atmosféře, aby
45 byl z vrstev odstraněn vodík, který Mg atomy kompenzuje. Během žíhání však dochází k difúzi Mg atomů skrz AlGaN bariéru. Pokud dojde k prodifundování Mg atomů do oblasti GaN kanálu dochází k významnému zhoršení vlastností elektronového kanálu, ke snížení pohyblivosti elektronů a zároveň ke snížení plošné hustoty náboje v kanálu. Tato zpětná difúze Mg atomů do oblastí elektronového kanálu je vážným technologickým problémem při realizaci e-HEMT
50 struktur.

Patent US 8436398 se snaží snížit zpětnou difúzi Mg do oblasti elektronového kanálu dvěma metodami. První způsob se týká architektury bariérové vrstvy, která sestává ze dvou AlGaN
vrstev s různou koncentrací Al. Vrstva s vyšší koncentrací je umístěna v blízkosti GaN
55 elektronového kanálu a má snížit zpětnou difúzi. Druhý způsob je gradace dopování Mg v GaN

krycí vrstvě, kdy nejnižší koncentrace je v oblasti GaN přiléhající k AlGaN bariéře, zatímco nejvyšší koncentrace Mg je v oblasti pod hradlem.

5 Patent US 8431960 B2 se snaží snížit zpětnou difúzi Mg pomocí tzv. difúzních bariér tvořených MgN vrstvami. Tyto difúzní bariéry vzniknou při krátkých přerušeních růstu při růstu GaN:Mg - zamezení vstupu trimethylgalia TMGa do reaktoru, zatímco průtok prekursoru Mg a čpavku zůstává zachován.

10 Existuje také řada patentů využívajících pro HEMT struktury střídání AlN a GaN vrstev nebo obsahujících tzv. supermřížky AlN/GaN, tyto vrstvy však mají jinou funkci a používají se pro zdokonalení krystalografické struktury, snížení pnutí a počtu dislokací v epitaxní struktuře. Z patentu US 8853828 je známá krystalová struktura se supermřížkou tvořenou např. patnácti dvojicemi vrstev GaN a tenkých vrstev AlN, která se nachází mezi vrstvou z GaN s elektronovým kanálem a vrstvou např. AlGaN. K vrstvě tvořící elektronový kanál přiléhá tenká (několik nm) vrstva AlN. Obdobně z japonské patentové přihlášky JP 2007250721 je známá periodická struktura AlN/GaN, nacházející se mezi vrstvou s volnými elektrony a vrstvou AlGaN.

20 Ze stavu techniky není známé žádné řešení, které by využívalo střídání AlN a GaN vrstev pro vytvoření bariérové vrstvy nad elektronovým kanálem.

Podstata vynálezu

25 Podstatou tohoto vynálezu je nahrazení konvenčních AlGaN bariér nad elektronovým kanálem, které jsou používány ve HEMT strukturách, bariérou složenou z několika střídajících se binárních vrstev AlN a GaN. Vznikne tak několiknásobná AlN bariéra nad elektronovým kanálem. Polohou „nad elektronovým kanálem“ se rozumí poloha, která se v tranzistoru obsahujícím strukturu podle vynálezu nachází ve směru od substrátu bezprostředně nad elektronovým kanálem, mezi elektronovým kanálem a další nitridovou vrstvou, nad kterou pak se nachází hradlo.

35 Podle vynálezu se, z hlediska pořadí vrstev počínaje od substrátu, nad vrstvou s elektronovým kanálem vytvořenou z nedopovaného GaN, nachází bariérová vrstva sestávající ze střídajících se binárních vrstev AlN a GaN. Bariérová vrstva může obsahovat jedinou nebo více dvojic GaN/AlN, přičemž však přiléhá k elektronovému kanálu vždy AlN vrstvou.

Výhodné je, když jsou AlN vrstvy alespoň dvě.

40 Polovodičová struktura tranzistoru s vysokou pohyblivostí elektronů na bázi GaN podle vynálezu zahrnuje, v pořadí vycházející od substrátu, viz obrázek 1(b):

- podkladové vrstvy, které zlepšují elektrické a krystalografické parametry HEMT struktury, jako např. uhlíkem dotované GaN vrstvy, AlN/AlGaN supermřížky, AlInN vrstvy apod.
- 45 • nelegovanou GaN vrstvou s elektronovým kanálem
- bariérovou vrstvou podle vynálezu sestávající ze střídajících se binárních vrstev AlN a GaN, přičemž binární vrstvy AlN jsou alespoň dvě, s výhodou z několika, vhodně ze 2 až 16, dvojic vrstev AlN a GaN, přičemž k elektronovému kanálu přiléhá tenká vrstva AlN, bariérová struktura může být nahoře zakončena buď GaN nebo AlN vrstvou
- 50 • p-typovou GaN vrstvou dotovanou hořčíkem.

55 Každá AlN vrstva má tloušťku v rozmezí 0,3 až 2,8 nm, s výhodou 0,3 až 2,5 nm, a každá GaN vrstva má tloušťku v rozmezí 1,5 až 10 nm. Aby bylo možné vytvořit e-HEMT strukturu pomocí p-typové dotace krycí vrstvy, neměl by součet tlouštěk všech AlN vrstev přesáhnout hodnotu 3,5 nm. Pro struktury s trvale otevřeným kanálem může být sumární tloušťka AlN vrstev vyšší.

5 Součet tloušťek všech vrstev AlN a GaN odpovídá výsledné tloušťce bariéry, která se obvykle pohybuje mezi 10 až 15 nm. Nová architektura bariérové vrstvy však umožňuje i zvýšení tloušťky nad tyto obvyklé hodnoty, například na 40 nm, při zachování celkového součtu tloušťek AlN vrstev v rozmezí hodnot 2,0 až 3,5 nm pro e-HEMT struktury.

Poměr vrstev AlN a GaN se vhodně optimalizuje tak, aby polarizační pole v elektronovém kanálu a hustota náboje elektronového plynu byla stejná jako při použití klasické AlGaN bariéry.

10 Nová architektura bariéry podle tohoto vynálezu umožňuje také dotovat jednu nebo dvě poslední, z hlediska směru od substrátu vzhůru tedy horní, vrstvy GaN v bariéře atomy hořčíku, což zesílí účinek p-typového dotování krycí GaN vrstvy a požadované vyprázdnění elektronového kanálu bez přiloženého napětí.

15 Jak je výše uvedeno, polarizační pole vytvořené vhodně navrženou několikanásobnou AlN bariérou podle vynálezu je ekvivalentní konvenční AlGaN bariéře, avšak střídání binárních vrstev přináší oproti AlGaN bariéře výhody spočívající zejména v bránění difúzi cizích atomů do oblasti elektronového kanálu.

20 Zbytková nezáměrná n-typová dotace konvenčních AlGaN vrstev se pohybuje kolem 10^{17} cm^{-3} , což je téměř o řád více než je tomu v případě binárních GaN nebo AlN vrstev. Tato n-typová dotace částečně kompenzuje p-typové dotování hořčíkem. Záměna klasické AlGaN bariéry za vícenásobnou AlN bariéru tuto nežádoucí kompenzaci potlačuje.

25 Struktura s bariérou složenou z několika střídajících se binárních vrstev AlN a GaN podle vynálezu je výhodná zejména pro použití v konstrukci vysoce žádaných součástek s vyprázdněným elektronovým kanálem bez přiloženého napětí, které je dosaženo dotováním Mg v krycí GaN vrstvě. Vynalezená struktura bariéry snižuje nežádoucí zpětnou difúzi Mg atomů z GaN krycí vrstvy do oblasti elektronového kanálu. Při návrhu struktury s vyprázdněným kanálem nesmí celková sumární tloušťka AlN vrstev v bariéře překročit 3,5 nm.

35 Difúze Mg atomů během růstu následných krycích vrstev do vrstvy GaN je téměř poloviční oproti difúzi do konvenční ternární AlGaN vrstvy, což je způsobeno mnohem větší krystalografickou dokonalostí binárního polovodiče.

I velmi tenká AlN vrstva může až o řád snížit difúzi Mg atomů, což se přisuzuje především vlivu rozhraní na potlačení difúze. Při použití několikanásobných AlN vrstev je efekt znásoben.

40 Epitaxní vícevrstvá polovodičová struktura podle vynálezu je vhodná zejména pro tranzistor s elektronovým kanálem, který je bez přiloženého napětí zavřený. Struktura s násobnou AlN bariérou umožňuje dotovat hořčíkem i v oblasti bariér, čímž se zesílí zavření elektronového kanálu, a umožní se tak dosáhnout vyššího napětí nutného pro otevření elektronového kanálu.

45 Všechny tyto výše zmíněné výhody působí synergicky při konstrukci e-HEMT struktury. Kombinace snížení difúze v GaN a AlN vrstvách s několika AlN/GaN rozhraními vytváří pro nežádoucí difúzi Mg atomů efektivní bariéru, snížení nežádoucí n-typové dotace bariéry a možnost p-typové dotace v oblasti bariér umožní zvýšit napětí pro otevření elektronového kanálu při zachování vysoké vodivosti kanálu v otevřeném stavu.

50

Objasnění výkresů

Obr. 1(a) představuje schematické znázornění řezu klasickou e-HEMT strukturou s AlGaN bariérou s konvenční bariérovou AlGaN podle dosavadního stavu techniky.

55

Obr. 1(b) představuje schematické znázornění řezu e-HEMT strukturou s architekturou bariérové vrstvy podle tohoto vynálezu.

5 Obr. 2 představuje grafické porovnání průběhu hrany vodivostního pásu v heterostruktuře, ve strukturách podle příkladu 1 a příkladu 4 s průběhem hrany vodivostního pásu ve struktuře s klasickou AlGaIn bariérou. Hrana vodivostního pásu představuje nejnižší energii, kterou může volně se pohybující elektron nabývat v daném materiálu v daném místě heterostruktuře. V horní části obrázku je znázorněn průběh hrany vodivostního pásu v závislosti na jeho poloze v heterostruktuře od povrchu až do rozhraní nedotované GaN vrstvy s podkladovou vrstvou. 10 Zvýšení energie vodivostního pásu v oblasti 0 až 60 nm je způsobeno dotací hořčíkem a umožňuje tak vyprázdňení elektronového kanálu (zavření kanálu bez přiloženého napětí). V dolní části obrázku je detail tohoto průběhu hrany vodivostního pásu v aktivní oblasti heterostruktuře sestávající z bariérové vrstvy a přiléhajícího elektronového kanálu v nedotovaném GaN.

15 Obr. 3 znázorňuje plošnou hustotu náboje v elektronovém kanálu pro struktury s bariérovou vrstvou podle tohoto vynálezu s pětinasobnou vrstvou AlN pro různé sumární tloušťky AlN a pro strukturu s klasickou AlGaIn bariérou v závislosti na tloušťce krycí p-typové GaN vrstvy dotované hořčíkem, přičemž znázorněn je ideální stav s perfektně ostrými rozhraními mezi GaN a AlN. Na ose x uvedená p-typová koncentrace děr odpovídá dotaci přibližně $4 \cdot 10^{19}$ atomů Mg na cm^3 . 20

Obr. 4 představuje grafické porovnání průběhu hrany vodivostního pásu ve strukturách podle příkladu 1 s celkovou tloušťkou bariéry 15 nm a příkladu 2 s celkovou tloušťkou bariéry rozšířenou na 25 nm. 25

Obr. 5 představuje grafické porovnání průběhu hrany vodivostního pásu ve strukturách podle příkladu 4 a příkladu 5 s průběhem hrany vodivostního pásu ve struktuře s klasickou AlGaIn bariérou.

30 Obr. 6 představuje grafické porovnání průběhu hrany v heterostruktuře podle příkladu 6 vynálezu s průběhem hrany vodivostního pásu ve struktuře s klasickou AlGaIn bariérou.

Příklady uskutečnění vynálezu

35

Příklad 1

HEMT struktura s pěti AlN vrstvami 5 a celkovou tloušťkou 15 nm

40 Vícevrstvá polovodičová struktura je připravena na Si substrátu 1 s orientací (111) a standardních podkladových vrstvách 2 obsahujících GaN, AlGaIn nebo AlN vrstvy, které mají za úkol snížit počet dislokací, upravit pnutí ve struktuře a zvýšit elektrický odpor podkladové vrstvy. Struktura může být připravena jak standardně používanou metodou plynné epitaxe z organokovových sloučenin (MOVPE), tak i metodou epitaxe z molekulárních svazků (MBE) nebo jejich 45 kombinací.

Struktura podle příkladu 1 obsahuje následující části:

50 1. nelegovaná GaN vrstva 3 o tloušťce 200 nm s elektronovým kanálem 4

2. bariérová struktura podle tohoto vynálezu sestávající z pěti dvojic vrstev, každá dvojice vrstev má AlN vrstvu 5 a GaN vrstvu 6, tyto AlN a GaN vrstvy 5, 6, se pak v bariérové struktuře střídají. Každá AlN vrstva 5 má tloušťku 0,5 nm a každá GaN vrstva 6 tloušťku 2,5 nm. Celková tloušťka složené bariéry je 15 nm. Bariérová struktura začíná tenkou AlN vrstvou 5 přiléhající k 55 elektronovému kanálu a je nahoře zakončena nedotovanou GaN vrstvou 6.

3. p-tyповá GaN vrstva 7 dotovaná hořčíkem na koncentraci Mg atomů $5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ s tloušťkou 60 nm.

- 5 Struktura je schematicky zobrazena na Obr. 1(b). Průběh hrany vodivostního pásu této struktury (čárkovaná čára) a srovnání s klasickou strukturou tvořenou AlGaIn bariérou (plná tlustá čára) je znázorněn na Obr. 2.

Příklad 2

10

HEMT struktura s pěti AlN vrstvami a celkovou tloušťkou 25 nm

Vícevrstvá polovodičová struktura je připravena na Si substrátu 1 s orientací (111) a standardních podkladových vrstvách 2 obsahujících na obrázcích neznázorněné GaN, AlGaIn nebo AlN vrstvy.

15

Struktura je připravena podle Příkladu 1, avšak s tlustšími GaN vrstvami 6.

Struktura obsahuje následující části:

20

1. nelegovaná GaN vrstva 3 o tloušťce 200 nm s elektronovým kanálem 4

2. bariérová struktura podle tohoto vynálezu sestávající z pěti dvojic AlN a GaN vrstev 5, 6. Každá AlN vrstva 5 o tloušťce 0,5 nm a každá GaN vrstva 6 o tloušťce 4,5 nm. Celková tloušťka složené bariéry je 25 nm. Bariérová struktura začíná tenkou vrstvou AlN 5 přiléhající k elektronovému kanálu 4 a je nahoře zakončena nedotovanou GaN vrstvou 6.

25

3. p-tyповá GaN vrstva 7 dotovaná hořčíkem na koncentraci Mg atomů $5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ s tloušťkou 60 nm.

30

Na obr. 4 je grafické porovnání průběhu hrany vodivostního pásu ve strukturách podle tohoto příkladu s celkovou tloušťkou bariéry 25 nm a podle příkladu 1 s celkovou tloušťkou bariéry 15 nm. Průběh hrany vodivostního pásu a tedy i chování heterostruktury nezávisí na tloušťce složené bariéry, pokud zůstává suma tlouštěk AlN vrstev 5 konstantní a tloušťka složené bariéry je měněna pouze tloušťkou GaN vrstev 6. Tloušťka GaN:Mg krycí vrstvy 7 je 60 nm, sumární tloušťka AlN vrstvy 5 je 2,5 nm.

35

Příklad 3

HEMT struktura s pěti AlN vrstvami a celkovou tloušťkou 25 nm a dvěma dotovanými vrchními bariérovými GaN vrstvami

40

Vícevrstvá polovodičová struktura je připravena na Si substrátu 1 s orientací (111) a standardních podkladových vrstvách 2 obsahujících GaN, AlGaIn nebo AlN vrstvy. Struktura je připravena podle Příkladu 2, avšak dvě vrchní GaN vrstvy 6 jsou dotovány Mg.

45

Struktura obsahuje následující části:

1. nelegovaná GaN vrstva 3 o tloušťce 200 nm s elektronovým kanálem 4

50

2. bariérová struktura podle tohoto vynálezu sestávající z pěti dvojic AlN a GaN vrstev 5, 6. Každá AlN vrstva 5 o tloušťce 0,5 nm a každá GaN vrstva 6 o tloušťce 4,5 nm. Celková tloušťka složené bariéry je 25 nm. Bariérová struktura začíná tenkou vrstvou AlN 5 přiléhající k elektronovému kanálu a je nahoře zakončena nedotovanou GaN 6 vrstvou. Dvě vrchní GaN vrstvy (z celkově pěti vrstev) jsou dotovány na koncentraci Mg atomů $1 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$.

55

3. p-tyповá GaN vrstva dotovaná hořčíkem 7 na koncentraci Mg $5 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$ s tloušťkou 60 nm.

Příklad 4

HEMT struktura se třemi AlN vrstvami a celkovou tloušťkou 15 nm

5

Vícevrstvá polovodičová struktura je připravena na Si substrátu 1 s orientací (111) a standardních podkladových vrstvách 2 obsahujících GaN, AlGaIn nebo AlN vrstvy.

Struktura obsahuje následující části:

10

1. nelegovaná GaN vrstva 3 o tloušťce 200 nm s elektronovým kanálem 4

2. bariérová struktura podle tohoto vynálezu sestávající ze tří dvojic 5, 6 vrstev AlN a GaN. Každá AlN vrstva 5 o tloušťce 0,8 nm a každá GaN vrstva 6 o tloušťce 4,2 nm. Celková tloušťka složené bariéry je 15 nm. Bariérová struktura začíná tenkou AlN vrstvou 5 přiléhající k elektronovému kanálu a je nahoře zakončena nedotovanou GaN vrstvou 6.

15

3. p-typová GaN vrstva 7 dotovaná hořčíkem na koncentraci $Mg \cdot 10^{19} cm^{-3}$ s tloušťkou 60 nm.

20 Na obr. 2 je znázorněn průběh hrany vodivostního pásu, vyjádřené jako nejnížší energie volně se pohybujícího elektronu v elektronvoltech, v závislosti na jeho hloubce v heterostruktuře podle tohoto příkladu (tenká plná čára). Průběh vodivostního pásu je na Obr. 2 srovnáván také pro strukturu podle příkladu 1 (5 AlN vrstev - čárkovaná čára) a pro klasickou strukturu s AlGaIn bariérou s molárním podílem AlN složky 25%. Suma tlouštěk AlN vrstev 5 je 2,4 nm v obou
25 případech složených bariér. Energie vodivostního pásu na rozhraní bariéra – oblast elektronového kanálu, a tedy i plošná hustota náboje v kanálu, nezávisí na počtu dvojic AlN a GaN vrstev 5, 6.

Příklad 5

30 HEMT struktura se třemi AlN vrstvami a celkovou tloušťkou 15 nm zakončená AlN vrstvou

Vícevrstvá polovodičová struktura je připravena na Si substrátu 1 s orientací (111) a standardních podkladových vrstvách 2 obsahujících GaN, AlGaIn nebo AlN vrstvy.

35 Struktura obsahuje následující části:

1. nelegovaná GaN vrstva 3 o tloušťce 200 nm s elektronovým kanálem 4

2. bariérová struktura podle tohoto vynálezu sestávající ze dvou dvojic vrstev 5, 6 AlN a GaN. Každá AlN vrstva 5 o tloušťce 0,8 nm a každá GaN vrstva 6 o tloušťce 6,3 nm. Bariérová struktura začíná tenkou vrstvou AlN 5 přiléhající k elektronovému kanálu 4 za poslední dvojicí vrstev 5, 6 AlN a GaN je bariérová vrstva ukončena AlN vrstvou 5 o tloušťce 0,8 nm. Celková tloušťka složené bariéry je 15 nm.

40

45 3. p-typová GaN vrstva 7 dotovaná hořčíkem na koncentraci $Mg \cdot 10^{19} cm^{-3}$ s tloušťkou 60 nm.

Na obr. 5 je znázorněn průběh hrany vodivostního pásu ve struktuře s Mg dotací GaN krycí vrstvy 7 pro strukturu podle tohoto příkladu (čerchovaná čára), u které je bariérová struktura zakončena AlN vrstvou 5, to znamená, že je vynechána nedotovaná GaN vrstva, takže GaN:Mg vrstva 7 sousedí přímo s AlN vrstvou 5. Na obr. 5 je pro srovnání ukázán také průběh hrany vodivostního pásu pro strukturu se složenou bariérou tvořenou třemi AlN vrstvami 5 podle příkladu 4 (tenká čára) a s klasickou AlGaIn bariérou 8 (čerchovaná čára).

50

Příklad 6

HEMT struktura se třemi AlN vrstvami a celkovou tloušťkou 12,5 nm

5

Vícevrstvá polovodičová struktura je připravena na Si substrátu 1 s orientací (111) a standardních podkladových vrstvách 2 obsahujících GaN, AlGaIn nebo AlN vrstvy.

Struktura obsahuje následující části:

10

1. nelegovaná GaN vrstva 3 o tloušťce 200 nm s elektronovým kanálem 4

2. bariérová struktura podle tohoto vynálezu sestávající ze tří dvojic vrstev 5, 6 AlN a GaN. Každá AlN vrstva 5 o tloušťce 0,7 nm a každá GaN vrstva 6 o tloušťce 3,5 nm. Celková tloušťka složené bariéry je 12,6 nm. Bariérová struktura začíná tenkou AlN vrstvou 5 přiléhající k elektronovému kanálu a je nahoře zakončena nedotovanou GaN vrstvou 6.

15

3. p-typová GaN vrstva 7 dotovaná hořčíkem na koncentraci $Mg \cdot 10^{19} cm^{-3}$ s tloušťkou 60 nm.

20 Průběh hrany vodivostního pásu této struktury (čárkovaná čára) a srovnání s klasickou strukturou tvořenou slitinovou AlGaIn bariérou 8 s molárním podílem AlN 25 % a tloušťkou 12,6 nm (plná čára) je znázorněn na Obr. 6. Tloušťka GaN:Mg krycí vrstvy 7 je 60 nm. Tloušťka AlN vrstev 5 je 0,8 nm, tloušťka GaN vrstev 6 je 3,5 nm. U této připravené heterostruktury byl ověřen průběh koncentrace Mg atomů ve struktuře pomocí spektroskopie sekundárních odprášených iontů a bylo potvrzeno, že koncentrace Mg atomů na rozhraní této bariérové vrstvy a nedotované GaN vrstvy se snížila ve srovnání s klasickou AlGaIn bariérou stejné tloušťky, a to na hodnotu $8 \cdot 10^{16} cm^{-3}$.

25

Příklad 7

30

HEMT struktura se jedinou dvojicí AlN a GaN vrstev a celkovou tloušťkou 18 nm

Vícevrstvá polovodičová struktura je připravena na Si substrátu 1 s orientací (111) a standardních podkladových vrstvách 2 obsahujících GaN, AlGaIn nebo AlN vrstvy.

35

Struktura obsahuje následující části:

1. nelegovaná GaN vrstva 3 o tloušťce 200 nm s elektronovým kanálem 4

40 2. bariérová struktura podle tohoto vynálezu sestávající z jediné dvojice vrstev 5, 6 AlN a GaN. AlN vrstva 5 o tloušťce 2,2 nm a GaN vrstva 6 o tloušťce 15,3 nm. Celková tloušťka složené bariéry je 17,5 nm. Bariérová struktura začíná tenkou AlN vrstvou 5 přiléhající k elektronovému kanálu a je nahoře zakončena nedotovanou GaN vrstvou 6.

45

3. p-typová GaN vrstva 7 dotovaná hořčíkem na koncentraci $Mg \cdot 10^{19} cm^{-3}$ s tloušťkou 60 nm.

Příklad 8

Tranzistor se složenou bariérou s elektronovým kanálem bez přiloženého napětí zavřeným

50

Pro přípravu tranzistoru byla využita struktura podle příkladu 1. Její schéma je znázorněno na obr. 1(b). Struktura podle příkladu 1, obsahuje následující vrstvy: substrát 1, podkladové vrstvy 2, nelegovanou GaN vrstvu 3 s elektronovým kanálem 4, bariérovou vrstvou podle vynálezu sestávající ze střídajících se binárních vrstev 5 z nitridu hlinitého AlN a binárních vrstev 6 z nitridu galitého GaN, a p-typovou GaN vrstvu 7 dotovanou hořčíkem. Na povrchu p-typové GaN

55

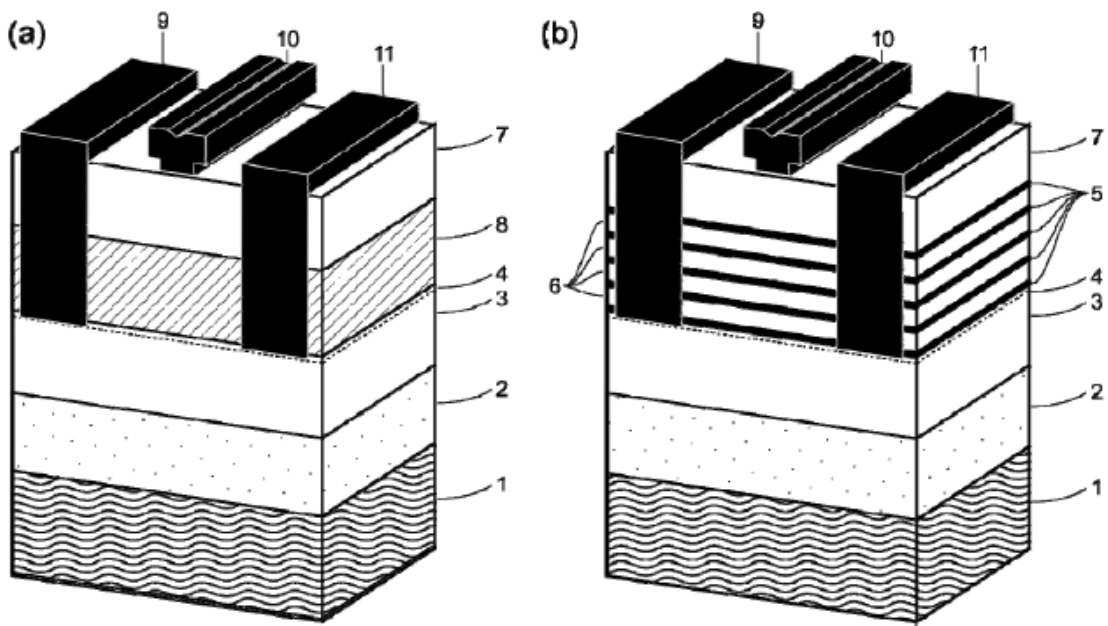
vrstvy 7 je nanesen hradlový kontakt 10. Kontakty pro emitor 9 a kolektor 11 jsou naneseny po odleptání příslušné oblasti p-typové GaN vrstvy 7 a bariérové struktury složené z vrstev 5 a 6. Proud procházející mezi emitorem 9 a kolektorem 11 je řízen napětím přivedeným na hradlo 10.

5

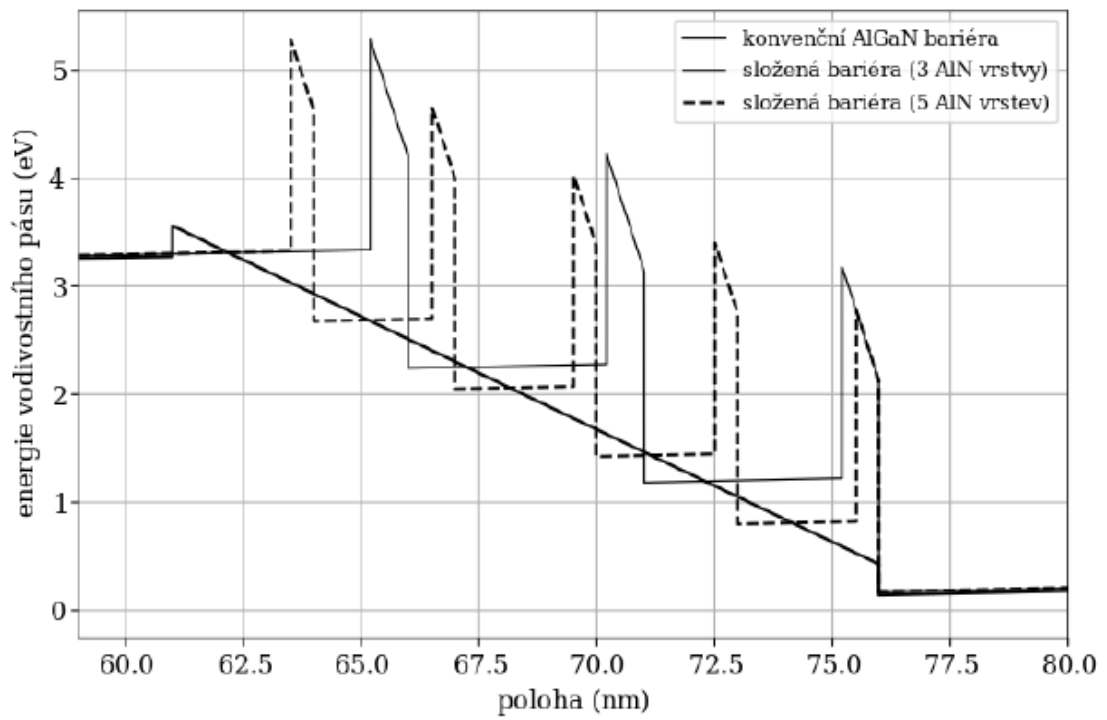
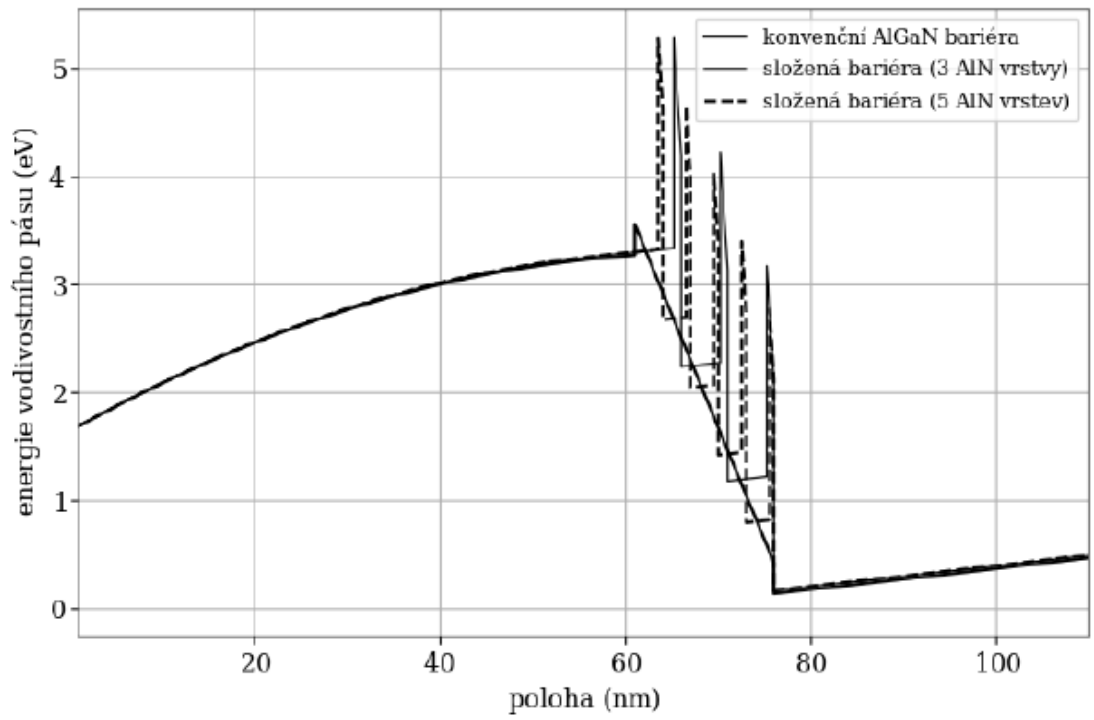
PATENTOVÉ NÁROKY

- 10 1. Epitaxní vícevrstvá struktura pro tranzistory s vysokou pohyblivostí elektronů, která má vrstvu s elektronovým kanálem, sestávající z nedopovaného GaN, nad níž je bariérová vrstva, **vyznačující se tím**, že bariérová vrstva sestává ze střídajících se binárních vrstev (5,6) AlN a GaN, přičemž bariérová vrstva začíná AlN vrstvou (5) přiléhající k elektronovému kanálu (4).
- 15 2. Epitaxní vícevrstvá struktura podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že binární vrstvy (5) AlN jsou alespoň dvě.
3. Epitaxní vícevrstvá struktura podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že bezprostředně nad bariérovou vrstvou se nachází GaN vrstva (7) dotovaná hořčíkem na vodivost p-typu.
- 20 4. Epitaxní vícevrstvá struktura podle nároku 1 nebo 2 nebo 3, **vyznačující se tím**, že každá AlN vrstva (5) má tloušťku v rozmezí 0,3 až 2,5 nm, přičemž součet tloušťek všech AlN vrstev (5) nepřesahuje hodnotu 3,5 nm, a každá GaN vrstva (6) má tloušťku v rozmezí 1,5 až 10 nm.
- 25 5. Epitaxní vícevrstvá struktura podle některého z nároků 1 až 4, **vyznačující se tím**, že bariérová vrstva je shora ukončena nedotovanou GaN vrstvou (6).
6. Epitaxní vícevrstvá struktura podle některého z nároků 1 až 4, **vyznačující se tím**, že bariérová vrstva je shora ukončena nedotovanou AlN vrstvou (5).
- 30 7. Epitaxní vícevrstvá struktura podle některého z předcházejících nároků, **vyznačující se tím**, že jedna nebo více vrchních GaN vrstev (6) bariérové vrstvy je dotována Mg na p-typovou vodivost.
- 35 8. Tranzistor s vysokou pohyblivostí elektronů na bázi GaN s elektronovým kanálem (4) bez přiloženého napětí zavřeným, **vyznačující se tím**, že obsahuje epitaxní vícevrstvou strukturu podle některého z nároků 2 až 7.

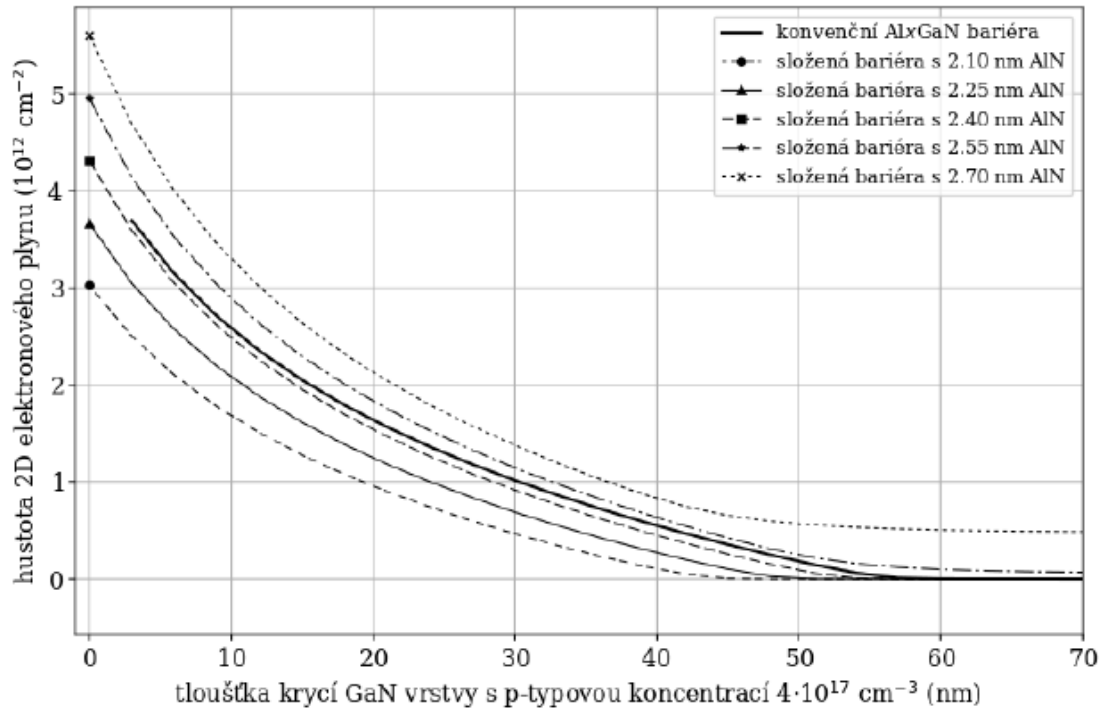
4 výkresy



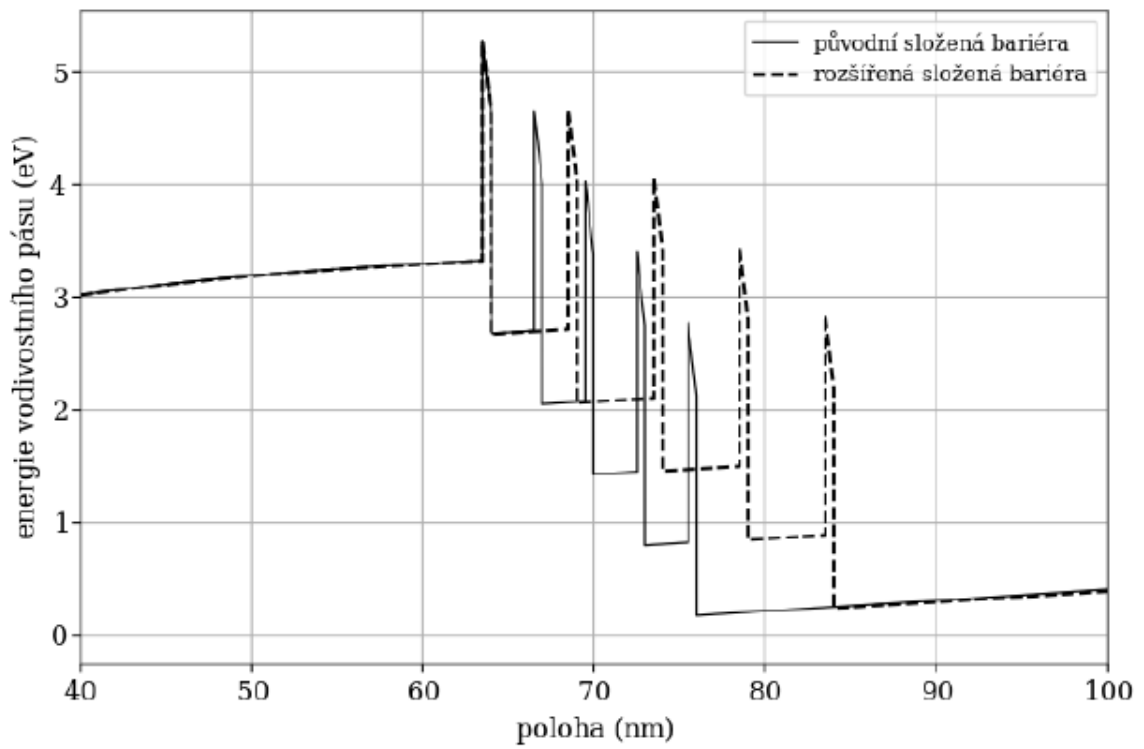
Obr. 1



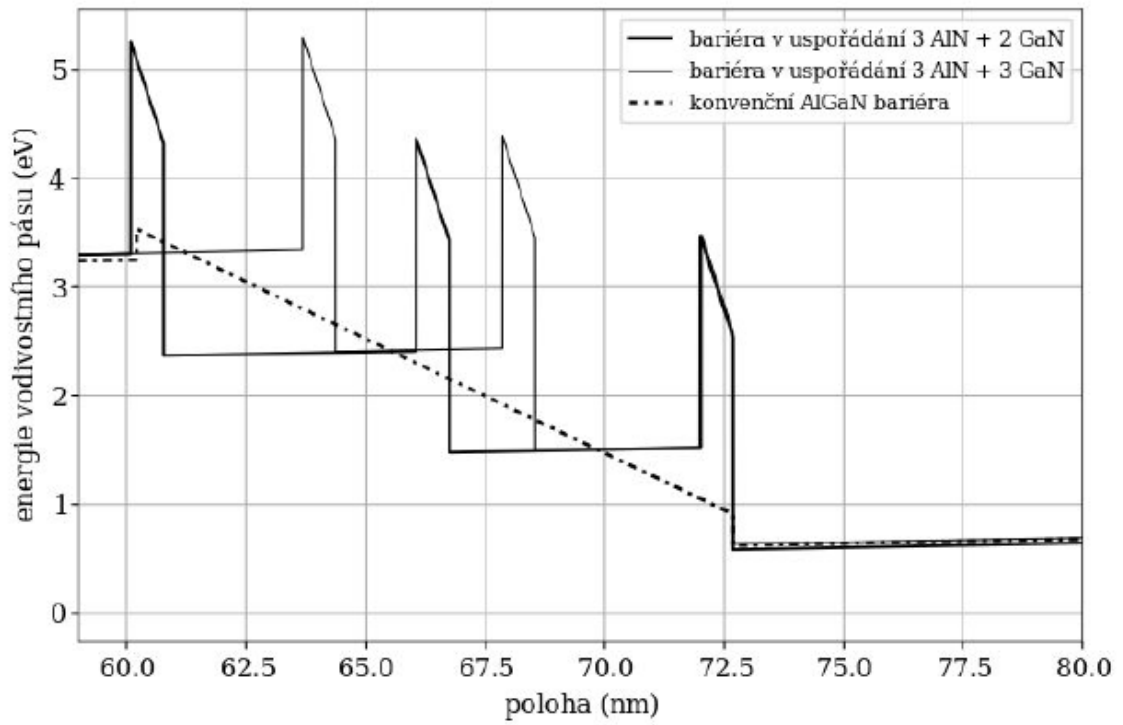
Obr. 2



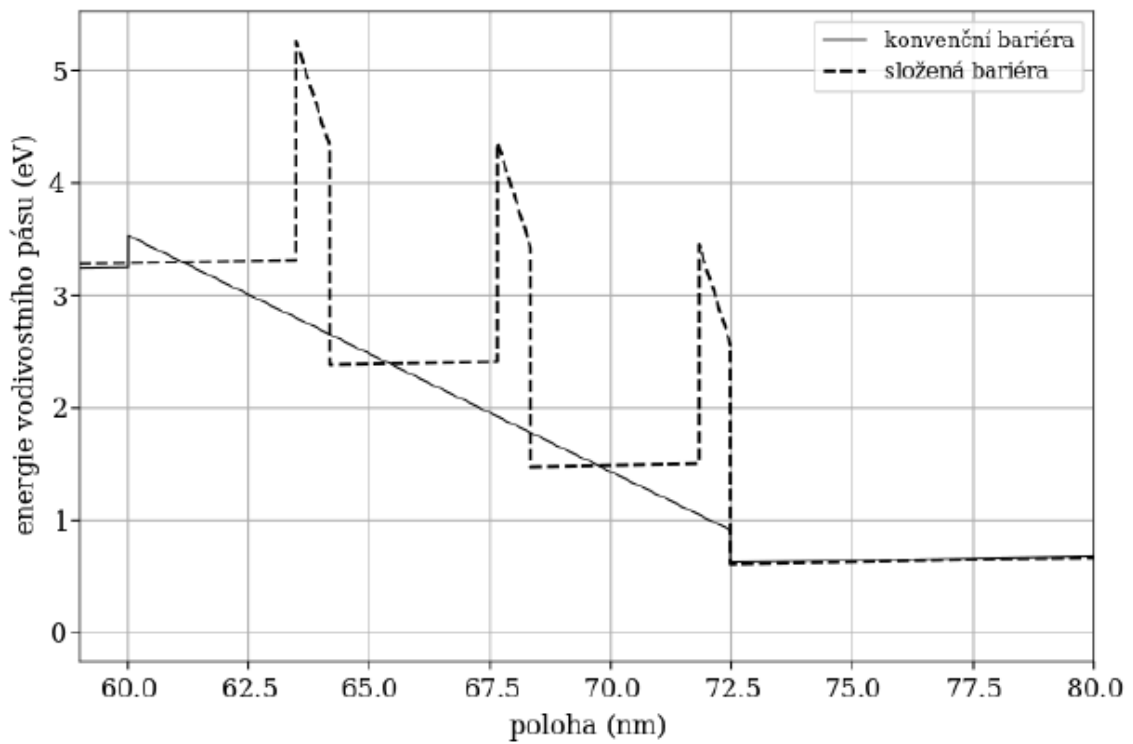
Obr. 3



Obr. 4



Obr. 5



Obr. 6