

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

307 721

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

G01T 1/24 (2006.01)
G01T 1/164 (2006.01)
H01L 31/0264 (2006.01)
H01L 31/0304 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2017-556**
(22) Přihlášeno: **19.09.2017**
(40) Zveřejněno: **20.03.2019**
(Věstník č. 12/2019)
(47) Uděleno: **06.02.2019**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **20.03.2019**
(Věstník č. 12/2019)

(56) Relevantní dokumenty:
HOSPODKOVÁ, A. ET AL: „On the correlations between the excitonic luminescence efficiency and the QW numbers in multiple InGaN/GaN QW structure“ JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 121, 214505 (2017); [HTTPS://DOI.ORG/10.1063/1.4984908](https://doi.org/10.1063/1.4984908), ISSN: 0021-8979.
CZ 306 026 B6; EP 1 736 524 A1.

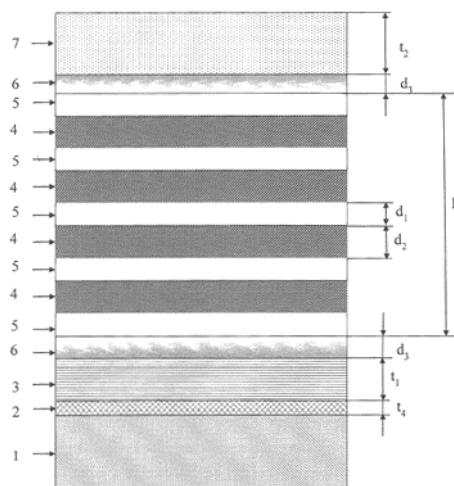
(73) Majitel patentu:
CRYTUR, spol. s r.o., Turnov, CZ
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Praha 8, CZ

(72) Původce:
Ing. Alice Hospodková, Ph.D., Praha 6, Veveřská, CZ
Ing. Markéta Zíková, Ph.D., České Budějovice,
České Budějovice 3, CZ
Ing. Karel Blažek, Turnov, CZ

(74) Zástupce:
PatentCentrum Sedlák & Partners s.r.o., Husova tř.
1847/5, 370 01 České Budějovice, České
Budějovice 3

(54) Název vynálezu:
Scintilační detektor pro detekci ionizujícího záření

(57) Anotace:
Scintilační detektor pro detekci ionizujícího záření zahrnující alespoň dvě nitridové polovodičové vrstvy (3, 4, 5, 6) uspořádané do vrstvené heterostruktury, jejíž struktura obsahuje alespoň jednu vrstvu (5) potenciálové jámy pro zářivé rekombinace elektronů a děr, a dále zahrnující aktivní oblast heterostruktury sestávající z alespoň jedné aktivní dvojice nitridových polovodičových vrstev (4, 5) složené z bariérové vrstvy (4) a z vrstvy (5) potenciálové jámy, přičemž je nad nejvýše se nacházející aktivní dvojicí vrstev (4, 5) uspořádána alespoň jedna vrchní nitridová polovodičová vrstva (7). Dále je na alespoň jedné straně aktivní oblasti a/nebo uvnitř aktivní oblasti vložena alespoň jedna vrstva (6) s gradovaným složením, která sousedí s krajní vrstvou (5) potenciálové jámy, pro snížení potenciálové bariéry a usnadnění migrace elektronů a děr do aktivní oblasti heterostruktury.



CZ 307721 B6

Scintilační detektor pro detekci ionizujícího záření

Oblast techniky

5

Vynález se týká polovodičových scintilačních detektorů založených na nitridové heterostruktuře určených pro detekci ionizujícího záření, zejména elektronového, rentgenového a částicového záření.

10

Dosavadní stav techniky

Je známo, že pro použití v detektorech ionizujícího záření jsou vhodné polovodičové materiály se širokým zakázaným pásem např. GaN nebo ZnO. Tyto polovodičové materiály vykazují krátkou dobu dosvitu excitované luminiscence v řádu jednotek nanosekund. Výhodou scintilátorů založených na nitridu galitěm (GaN) a slitinách nitridu galitého s jinými nitridy kovů je radiační odolnost a možnost jejich přípravy s vysokou krystalografickou kvalitou ve formě heterostruktur skládajících se z monokrystalických epitaxních vrstev s různým složením nanesených nad sebou na velkých plochách monokrystalických substrátů. Tyto heterostrukтуры vykazují nízké nezářivé ztráty a úzké luminiscenční maximum. Nitridové luminiscenční struktury s InGaN kvantovými jamami jsou předmětem řady patentů, týkajících se emisních diod, a dále několika patentů týkajících se scintilátorových struktur.

V přihlášce vynálezu US 2002/0195606 (A1) je řešena luminiscenční nitridová struktura emisní diody obsahující mnohonásobné InGaN/Al(In)GaN kvantové jámy obklopené vrstvami Al(In)GaN s n–typovou dotací z jedné strany aktivní oblasti a s p–typovou dotací z druhé strany aktivní oblasti.

Dalším známým dokumentem je přihláška vynálezu US 2014/0138617 A1, jejíž vynález se zabývá podobnou nitridovou luminiscenční heterostrukturou a mřížkovým přizpůsobením bariérových vrstev a vrstev představujících kvantové jámy, a to podobně, jako předcházející výše uvedený patent v diodové struktuře, kdy je aktivní oblast obklopena vrstvami s p–typovou dotací a s n–typovou dotací, případně vrstvami obsahujícími hliník. Mřížkové přizpůsobení uvažované v této přihlášce vynálezu sice snižuje piezoelektrický náboj na rozhraní vrstev, avšak náboj a bariéry způsobené složkou spontánní polarizace ve struktuře nadále způsobují zakřivení pásové struktury a vznik bariér pro elektrony nebo díry na krajích aktivní oblasti.

Z patentového dokumentu US 7053375 (B2) je znám polovodičový scintilátor pro excitaci ionizujícím zářením ve formě polovodiče tvořeného sloučeninou prvků III. skupiny periodické tabulky ve sloučenině s dusíkem. Tato polovodičová sloučenina je strukturována do vrstvy zformované na obecně popsaném substrátu. Dále může být mezi polovodičovou vrstvou a substrátem mezivrstva pro vyhlazení/zlepšení polovodičové struktury, tzv. podkladová vrstva. Různé sloučeniny dusíku s prvkem III. skupiny a jejich slitiny mohou být použity v odlišných vrstvách nanesených nad sebou a vytvářet heterostrukтуры.

45

V dalším známém patentovém dokumentu US 8 164 069 (B2) je popsán fluorescenční prostředek reagující na dopad elektronů světelnou emisí, tzv. luminiscencí. Fluorescenční prostředek zahrnuje nosný monokrystalický substrát, nitridovou polovodičovou sendvičovou strukturu, ve které se střídají vrstvy bariérové s vrstvami reprezentujícími potenciálové jámy. Polovodičové vrstvy vytvářejí heterostrukтуру, která je uspořádána na povrchu jedné strany substrátu. Potenciálové jámy jsou preferenčně tvořeny slitinovým polovodičem $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

50

V českém národním patentu CZ 306026 (B6) je řešena nitridová scintilační heterostrukтура s rychlým luminiscenčním dosvitem, který je dosažen zvýšením překryvu vlnových funkcí elektronů a děr, a to buď vyrovnáním polarizace bariérových vrstev s vrstvami představujícími

55

kvantové jámy, anebo vnořením tenké inverzní potenciálové bariéry do kvantové jámy. Podkladové vrstvy struktury mohou být dotovány křemíkem. Vynález řeší efektivnější excitaci aktivní oblasti, ale nezabývá se usnadněním transportu nosičů náboje do této aktivní oblasti.

- 5 Nevýhody výše uvedených patentových dokumentů spočívají v tom, že se buď týkají přímo světelných emisních diod (US 2002/0195606 (A1), US 2014/0138617 (A1)), nebo adoptují koncept využívaný ve světelných emisních diodách s výjimkou absence p–n přechodu ve struktuře a použití vyššího počtu kvantových jam (US 7053375 (B2), US 8164069 (B2)). Výše uvedené dokumenty nezohledňují dostatečně odlišný způsob excitace struktury a nezabývají se
10 efektivitou excitace aktivních vrstev scintilátorů.

U emisních diod dochází k excitaci struktury průchodem elektrického proudu a nosiče náboje (elektrony a díry) jsou injektovány do aktivní oblasti z jejich protilehlých stran, viz obr. 1(a). Avšak při excitaci heterostruktury dopadajícím ionizujícím zářením jsou nosiče náboje
15 generovány ve stejném místě heterostruktury, odkud pak musí oba nosiče náboje migrovat do aktivní oblasti ve stejném směru, aby došlo k požadované luminiscenci, je proto nežádoucí, aby bylo ve struktuře přítomno elektrické pole, ať již způsobené p–n přechodem viz obr. 1(a), nebo vlastním piezoelektrickým polem mezi rozhraními jednotlivých vrstev viz obr. 1(b).

20 V současné době se pro vyrovnání elektrického pole ve struktuře se používá n–typová dotace, a to nejčastěji pomocí atomů křemíku, viz obr. 1(c). N–typová dotace pomáhá srovnat elektrické pole v aktivní vrstvě, avšak na krajích aktivní vrstvy, konkrétněji na prvním rozhraní s kvantovou jámou, dochází ke vzniku potenciálové bariéry, která brání průniku jednoho typu nosičů náboje do aktivní oblasti, viz obr. 3a. V případě scintilátorů lze jen výjimečně udělat aktivní oblast
25 dostatečně širokou, aby všechno ionizující záření bylo absorbováno pouze v aktivní vrstvě. Při větších tloušťkách aktivní oblasti totiž dochází ke zhoršení krystalografické kvality vlivem pnutí ve struktuře.

Nevýhody dále spočívají v tom, že výše uvedené patenty neuvažují vznik této bariéry, která při migraci nosičů náboje ve stejném směru brání jednomu z nosičů náboje v průniku do aktivní oblasti, zatímco druhý typ nosičů náboje může penetrovat do aktivní oblasti bez bariéry, viz obr. 3a. Bariéra, která znesnadňuje jednomu z nosičů náboje proniknout do aktivní oblasti, tím
30 podstatně snižuje intenzitu luminiscence.

35 Úkolem vynálezu je vytvoření scintilačního detektoru pro detekci ionizujícího záření, který by odstraňoval nedostatky známých řešení, tj. který by umožňoval migrovat oběma typům nosičů náboje z místa jejich generace do aktivní oblasti s podobnou pravděpodobností, čímž by byl vytvořen scintilátor emitující intenzivnější luminiscenční odezvu na dopadající ionizující záření.

40

Podstata vynálezu

Vytčený úkol je vyřešen vytvořením scintilačního detektoru pro detekci ionizujícího záření, zejména elektronového záření, rentgenového záření, a částicového záření, podle tohoto vynálezu.
45

Scintilační detektor zahrnuje monokrystalický substrát, na kterém je nanášena alespoň jedna podkladová vrstva pro navázání alespoň jedné nitridové polovodičové vrstvy na substrát pomocí epitaxe. Alespoň jedna nitridová polovodičová vrstva je popsána obecným vzorcem

50 $Al_yIn_xGa_{1-x-y}N$, kde platí $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$ a $0 \leq x+y \leq 1$. Současně jsou alespoň dvě nitridové polovodičové vrstvy uspořádány do vrstvené heterostruktury, jejíž struktura obsahuje alespoň jednu vrstvu potenciálové jámy pro zářivé rekombinace elektronů a děr. Dále je na podkladové vrstvě uspořádána alespoň jedna spodní vrstva s n–typovou dotací, nad kterou je uspořádána aktivní oblast heterostruktury sestávající z alespoň jedné aktivní dvojice nitridových polovodičových vrstev složené z bariérové vrstvy typu $Al_{y_b}In_{x_b}Ga_{1-x_b-y_b}N$ a z vrstvy potenciálové
55 jámy typu $Al_{y_w}In_{x_w}Ga_{1-x_w-y_w}N$, pro které platí $x_b \leq x_w$ a $y_b \geq y_w$. Dopování n–typovým

dopantem je využito proto, aby došlo k částečnému vyrovnání piezoelektrického pole ve struktuře. Dále je ve směru od substrátu nad nejvýše se nacházející aktivní dvojicí vrstev uspořádána alespoň jedna vrchní nitridová polovodičová vrstva.

- 5 Podstata vynálezu spočívá v tom, že na alespoň jedné straně aktivní oblasti a/nebo uvnitř aktivní oblasti je vložena alespoň jedna vrstva typu $\text{Al}_{y_g}\text{In}_{x_g}\text{Ga}_{1-x_g-y_g}\text{N}$ s gradovaným složením o tloušťce menší než 5 nm, která sousedí s vrstvou potenciálové jámy, pro snížení potenciálové bariéry a usnadnění migrace elektronů a děr do aktivní oblasti heterostruktury.
- 10 Tato vrstva s gradovaným složením může být pouze na jednom kraji aktivní oblasti podle převažující absorpce ionizujícího záření v heterostruktuře, nebo může být použita na obou stranách aktivní oblasti. Případně může být gradovaná vrstva také použita uvnitř aktivní oblasti, a to zvláště v případě tlustých bariérových vrstev. Účelem této gradované vrstvy je snížit potenciálovou bariéru, kterou musí překonat elektrony nebo díry při průniku do aktivní oblasti z
- 15 podkladových, nebo z krycích vrstev heterostruktury, ve kterých také dochází k absorpci ionizujícího záření a ke generaci elektron–děrového páru. Takto navržené vrstvy s gradovaným složením tedy usnadní migraci elektronů a děr do aktivní vrstvy, a tím je dosaženo principiálního zvýšení intenzity luminiscence při detekci ionizujícího záření, zvláště pokud je ionizující záření absorbováno mimo aktivní vrstvu, jak je ukázáno na obr. 4 a 5. Vypočtený průběh hrany
- 20 valenčního a vodivostního pásu pro struktury s gradovanými vrstvami je znázorněn na obr. 3 pro gradovanou vrstvu ze strany podkladových vrstev.

Ve výhodném provedení scintilačního detektoru podle vynálezu má vrstva s gradovaným složením plynule se měnící složení. Plynulé složení zlepšuje vlastnosti přenosu nosiče náboje.

- 25 Na jedné straně má vrstva s gradovaným složením stejné složení jako spodní vrstva, bariérová vrstva nebo vrchní vrstva, tedy typu $\text{Al}_{y_p}\text{In}_{x_p}\text{Ga}_{1-x_p-y_p}\text{N}$. Ve směru k potenciálové jámě se ale složení vrstvy s gradovaným složením mění tak, že se změní hodnota y_p na hodnotu y_g , hodnota x_p se změní na hodnotu x_g , hodnota $1-x_p-y_p$ se změní na hodnotu $1-x_g-y_g$, přičemž platí $x_g \leq x_w$ a $y_w \leq y_g$. Obsah jednotlivých prvků III. skupiny periodické tabulky prvků se v této vrstvě postupně mění z hodnot v sousedící vrstvě na hodnoty vrstvy potenciálové jámy, tedy např. podíl hliníku se mění ve vrstvě s gradovaným složením z hodnoty y_p na hodnotu y_g , podíl india se mění z hodnoty x_p na x_g a podíl gallia z hodnoty $1-x_p-y_p$ na hodnotu $1-x_g-y_g$. Přitom platí, že $x_g \leq x_w$ a $y_w \leq y_g$, kde hodnoty x_p a y_p vyjadřují podíl india a hliníku v sousedící vrstvě a hodnoty x_w a y_w vyjadřují podíl india a hliníku ve vrstvě potenciálové jámy.
- 30
- 35

Ve výhodném provedení vynálezu se složení vrstvy s gradovaným složením mění z GaN na $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$.

- 40 Mezi výhody scintilačního detektoru vytvořeného podle tohoto vynálezu patří vyšší intenzita luminiscence, dosažená efektivnějším zaplňováním aktivní oblasti elektrony a dírami generovanými v podkladových, nebo v krycích vrstvách, díky snížení potenciálové bariéry pro elektrony, nebo díry, mezi aktivní oblastí a oblastí dominantní generace elektron–děrových párů.

45 Objasnění výkresů

Uvedený vynález bude blíže objasněn na následujících vyobrazeních, kde:

- 50 obr. 1a znázorňuje schematické vyobrazení průběhu energie hrany vodivostního a valenčního pásu emisní diodové nitridové heterostruktury s potenciálovými jámami podle stávajícího stavu techniky,

obr. 1b znázorňuje schematické vyobrazení průběhu energie hrany vodivostního a valenčního pásu podobné heterostrukтуры bez přítomnosti dotace okolních vrstev, kdy je výsledné elektrické pole způsobeno polarizačním nábojem na heterorozhraních,

- 5 obr. 1c znázorňuje schematické vyobrazení průběhu energie hrany vodivostního a valenčního pásu podobné heterostrukтуры s n–typovou dotací $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ve vrstvě pod aktivní oblastí,

obr. 2 znázorňuje schematické vyobrazení vrstev heterostrukтуры s vrstvami potenciálových jam podle tohoto vynálezu s vloženou vrstvou s gradovaným složením pod i nad aktivní oblastí,

10

obr. 3a znázorňuje vypočtený průběh hrany valenčního a vodivostního pásu pro strukturu podle stávajícího stavu techniky s n–typovou dotací $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ve vrstvě pod aktivní oblastí (s popisem vrstev a zvýrazněnou bariérou pro elektrony na spodním kraji aktivní oblasti),

- 15 obr. 3b znázorňuje vypočtený hrany valenčního a vodivostního pásu pro strukturu podle tohoto vynálezu s gradovanou vrstvou ze strany podkladových vrstev,

obr. 4a znázorňuje srovnání katodo luminiscenčních spekter vzorku s obvyklou strukturou deseti potenciálových jam a vzorku s gradovanými bariérami ze strany podkladových i krycích vrstev podle příkladu 3, kde spektra byla měřena při excitaci elektrony s kinetickou energií 2 keV pro průnik elektronů do struktury 30 nm a generaci elektron děrových párů nad aktivní oblastí,

20

obr. 4b znázorňuje srovnání katodoluminiscenčních spekter vzorku s obvyklou strukturou deseti potenciálových jam a vzorku s gradovanými bariérami ze strany podkladových i krycích vrstev podle příkladu 3, kde spektra byla měřena při excitaci elektrony s kinetickou energií 4 keV pro průnik elektronů do struktury 100 nm a generaci elektron děrových párů nad aktivní oblastí,

25

obr. 4c znázorňuje srovnání katodoluminiscenčních spekter vzorku s obvyklou strukturou deseti potenciálových jam a vzorku s gradovanými bariérami ze strany podkladových i krycích vrstev podle příkladu 3, kde spektra byla měřena při excitaci elektrony s kinetickou energií 12 keV pro průnik elektronů do struktury 600 nm a generaci elektron děrových párů nad aktivní oblastí,

30

obr. 5a znázorňuje fotoluminiscenci vzorku podle příkladu 4 měřenou při excitaci o vlnové délce 325 nm, při které je většina elektron–děrových párů generována mimo aktivní oblast,

35

obr. 5b znázorňuje fotoluminiscenci vzorku podle příkladu 4 měřenou při excitaci o vlnové délce 375 nm, při které je většina elektron–děrových párů generována přímo v aktivní oblasti, kde také elektrony a díry rekombinují.

40

Příklady uskutečnění vynálezu

45 Rozumí se, že dále popsané a zobrazené konkrétní případy uskutečnění vynálezu jsou představovány pro ilustraci, nikoliv jako omezení vynálezu na uvedené příklady. Odborníci znalí stavu techniky najdou nebo budou schopni zajistit za použití rutinního experimentování větší či menší počet ekvivalentů ke specifickým uskutečněním vynálezu, která jsou zde popsána. I tyto ekvivalenty budou zahrnuty v rozsahu následujících patentových nároků.

50 Na obr. 1a až obr. 1c je vyobrazen průběh vodivostního a valenčního pásu pro heterostrukтуры vykazující deset potenciálových jam, kde na obr. 1a je schematické vyobrazení průběhu energie hrany vodivostního a valenčního pásu emisní diodové nitridové heterostrukтуры s potenciálovými jámami vnořenými do p–n přechodu.

Na obr. 1b je schematické vyobrazení průběhu energie hrany vodivostního a valenčního pásu podobné heterostrukтуры bez přítomnosti dotace okolních vrstev, kdy je výsledné elektrické pole způsobeno polarizačním nábojem na heterorozhraních.

- 5 Na obr. 1c je schematické vyobrazení průběhu energie hrany vodivostního a valenčního pásu podobné heterostrukтуры s n–typovou dotací $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dle stávajícího stavu techniky.

Na obr. 2 je schematicky vyobrazena vrstvená heterostrukтура podle tohoto vynálezu. Přičemž je patrné schematické vyobrazení vrstev 3, 4, 5, 6 a 7 heterostrukтуры s vrstvami 5 potenciálových jam podle tohoto vynálezu a s vloženými vrstvami 6 s gradovaným složením pod i nad aktivní oblastí vrstvené heterostrukтуры. Vrstvená heterostrukтура je vytvořená na monokrystalickém substrátu 1 s pěti vrstvami 5 potenciálových jam o tloušťce d_1 střídavě proloženými čtyřmi bariérovými vrstvami 4 o tloušťce t_4 tvořícími aktivní oblast vrstvené heterostrukтуры o celkové výšce h . Na monokrystalickém substrátu 1 je vytvořena podkladová vrstva 2 o tloušťce t_2 pro nanesení spodní vrstvy 3 o tloušťce t_3 vrstvené heterostrukтуры epitaxi na monokrystalický substrát 1. Mezi spodní vrstvou 3 a v pořadí první vrstvou 5 potenciálové jámy je vložena vrstva 6 s gradovaným složením o tloušťce d_3 menší než 5 nm. Obdobně je tomu i mezi vrchní vrstvou 7 o tloušťce t_7 a v pořadí poslední vrstvou 6 potenciálové jámy.

- 20 V nevyobrazeném příkladu uskutečnění vynálezu může být mezi alespoň dvěma vrstvami 4 a 5 aktivní oblasti vložena vrstva 6 s gradovaným složením.

Složení vrstvy 6 s gradovaným složením se mění s rostoucí vzdáleností od sousedící vrstvy ke druhé straně u vrstvy 5 potenciálové jámy. Vrstva 6 s gradovaným složením se plynule mění z jednoho konkrétního materiálu sousedící vrstvy do materiálu vrstvy 5 potenciálové jámy.

Na obr. 3a je detailněji vyobrazen spočítaný průběh vodivostního a valenčního pásu ve struktuře s deseti vrstvami 5 potenciálových jam pro heterostrukтуру připravenou dle stávajícího stavu techniky s n–typovou Si dotací $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ve spodní vrstvě 3 pod aktivní oblastí s vyznačenou bariérou, která brání efektivnímu průniku elektronů do aktivní oblasti.

Na obr. 3b je vyobrazen spočítaný průběh vodivostního a valenčního pásu ve struktuře s deseti vrstvami 5 potenciálových jam pro heterostrukтуру připravenou dle tohoto vynálezu s n–typovou Si dotací $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ve vrstvě pod aktivní oblastí a s vrstvou 6 gradovaného složení těsně přiléhající ke spodní vrstvě 5 potenciálové jámy v aktivní oblasti. Ze srovnání s obr. 3a je patrné významné snížení bariéry pro elektrony.

- 40 Příklad 1 – Vrstvená heterostrukтура s vrstvou 6 s gradovaným složením uspořádanou ze strany vrstev 2 a 3 vhodná pro detekci rtg záření.

Součástí scintilátoru je vícevrstvá polovodičová nitridová heterostrukтура s GaN podkladovou vrstvou 2 o tloušťce $4 \text{ }\mu\text{m}$ připravená technologií MOVPE. Nitridová spodní vrstva 3 je dotována křemíkem s koncentrací $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ a má tloušťku 300 nm. Bariérové vrstvy 4 jsou tvořeny GaN a mají v aktivní oblasti tloušťku d_2 7 nm. Vrstvy 5 potenciálových jam s užším zakázaným pásem jsou tvořeny $\text{In}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$ a mají tloušťku d_1 1,5 nm. Mezi spodní vrstvou 3 a nejspodnější vrstvou 5 potenciálové jámy na kraji aktivní oblasti je vložena vrstva 6 s gradovaným složením o tloušťce d_3 3 nm. Složení této vrstvy 6 se plynule mění z GaN od spodní vrstvy 3 na $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ u hrany vrstvy 5 potenciálové jámy. Tloušťka vrchní vrstvy 7 je 100 nm.

Na obr. 3b je znázorněn vypočtený průběh energie hrany vodivostního a valenčního pásu pro tuto strukтуру s významným snížením bariéry pro elektrony.

Příklad 2 – Vrstvená heterostruktura s vrstvou 6 s gradovaným složením uspořádanou ze strany krycí vrstvy 7 vhodná pro detekci UV záření, iontů a elektronů s nízkou energií.

5 Součástí scintilátoru je vícevrstvá polovodičová nitridová heterostruktura s GaN podkladovou vrstvou 2 o tloušťce 4 μm připravená technologií MOVPE. Nitridová spodní vrstva 3 je dotována křemíkem s koncentrací $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ a má tloušťku 300 nm. Bariérové vrstvy 4 jsou tvořeny GaN a mají v aktivní oblasti tloušťku d_2 7 nm. Vrstvy 5 potenciálových jam s užším zakázaným pásem jsou tvořeny $\text{In}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$ a mají tloušťku d_1 1,5 nm. Mezi krycí vrstvu 7 a nejsvrchnější vrstvu 5 potenciálové jámy ležící na kraji aktivní oblasti je vložena vrstva 6 s gradovaným složením o 10 tloušťce d_3 3 nm. Složení této vrstvy 6 se plynule mění z GaN od vrchní vrstvy 7 na $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ u hrany vrstvy 5 potenciálové jámy. Tloušťka vrchní vrstvy 7 je 100 nm.

15 Příklad 3 – Vrstvená heterostruktura s vrstvou 6 s gradovaným složením uspořádanou ze strany vrchní vrstvy 7 i spodní vrstvy 3 vhodná pro detekci elektronů s širokým rozsahem energií.

20 Součástí scintilátoru je vícevrstvá polovodičová nitridová heterostruktura s GaN podkladovou vrstvou 2 o tloušťce 4 μm připravená technologií MOVPE. Nitridová spodní vrstva 3 je dotována křemíkem s koncentrací $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ a má tloušťku 300 nm. Bariérové vrstvy 4 jsou tvořeny GaN a mají v aktivní oblasti tloušťku d_2 7 nm. Vrstvy 5 potenciálových jam s užším zakázaným pásem jsou tvořeny $\text{In}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$ a mají tloušťku d_1 1,5 nm. Mezi krycí vrstvu 7 a nejsvrchnější vrstvu 5 potenciálové jámy ležící na kraji aktivní oblasti a dále mezi spodní vrstvou 3 a nejspodnější vrstvou 25 5 potenciálové jámy ležící na kraji aktivní oblasti jsou vloženy vrstvy 6 s gradovaným složením o tloušťce d_3 3 nm. Složení vrstev 6 se plynule mění z GaN na $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ u hrany vrstvy 5 potenciálové jámy pomocí změny teploty epitaxního růstu ze 730 na 800 °C. Tloušťka vrchní vrstvy 7 je 30 nm.

30 Na obr. 4 je znázorněn vliv použití vrstev 6 na zvýšení intenzity katodoluminiscence pro strukturu podle příkladu 3, s vrstvami 6 o tloušťce 3 nm před první a za poslední InGaN vrstvou 5 v aktivní oblasti. Zvýšení luminiscence je ukázáno na katodoluminiscenčních spektrech naměřených pro detekci elektronů s různou hloubkou průniku do heterostruktury. Nejvýraznějšímu zvýšení intenzity luminiscence je dosaženo při absorpci elektronů pod a nad aktivní oblastí, viz obr. 4a a obr 4c.

35 Příklad 4 – Vrstvená heterostruktura s vrstvami 6 mezi všemi InGaN vrstvami 5 a GaN bariérovými vrstvami 4 vhodná pro detekci ionizujícího záření s širokým rozsahem energií

40 Součástí scintilátoru je vícevrstvá polovodičová nitridová heterostruktura s GaN podkladovou vrstvou 2 o tloušťce t_4 4 μm připravená technologií MOVPE. Nitridová spodní vrstva 3 je dotována křemíkem s koncentrací $5 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ a má tloušťku t_1 300 nm. Bariérové vrstvy 4 jsou tvořeny GaN a mají v aktivní oblasti tloušťku d_2 7 nm. Vrstvy 5 s užším zakázaným pásem jsou tvořeny $\text{In}_{0,06}\text{Ga}_{0,94}\text{N}$ a mají tloušťku d_1 1,5 nm. Mezi každou vrstvou 5 a bariérovou vrstvou 4 je 45 vložena vrstva 6 s gradovaným složením o tloušťce d_3 2 nm. Složení této vrstvy 6 se při epitaxi plynule mění z $\text{In}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{N}$ u hrany vrstvy 5 na GaN u hrany bariérové vrstvy 4, změny složení je dosaženo plynulou změnou teploty během epitaxe této vrstvy ze 720 na 800 °C. Tloušťka vrchní vrstvy 7 je 50 nm.

50 Na obr. 5a je znázorněn vliv použití vrstev 6 o tloušťce d_3 2 nm mezi každou InGaN vrstvou 5 a GaN bariérovou vrstvou 4 (struktura podle příkladu 4) na zvýšení intenzity fotoluminiscence v případě, že k absorpci excitujícího záření dochází nad aktivní oblastí směrem ze strany vrchní vrstvy 7. U tohoto vzorku byla vrstva 6 použita na horním rozhraní každé vrstvy 5 s bariérovou vrstvou 4. Excitace světlem s vlnovou délkou 375 nm, při které jsou elektron děrové páry excitovány přímo ve vrstvách 5, byla použita pro ověření, že zesílení luminiscence bylo dosaženo 55 díky vložení vrstvy 6 a efektivnějšímu průniku nosičů náboje do aktivní oblasti.

Na obr. 5b je dokázáno, že pokud jsou nosiče náboje generovány přímo v aktivní oblasti bez nutnosti migrace, k žádnému zesílení luminiscence u této struktury nedochází.

5

Průmyslová využitelnost

Scintilační detektor pro detekci ionizujícího záření, zejména elektronového, rentgenového nebo částicového záření, podle vynálezu nalezne mimo jiné především uplatnění v medicínských oborech pracujících s ionizujícím zářením, v elektronových mikroskopech, v přístrojích vyžadujících rychlou detekci určených pro výzkum, nebo pro analýzu materiálů a výrobků, zejména v aplikacích diagnostiky kvality integrovaných obvodů a jiných elektronických součástek, dále v mikroradiografii, včetně rychlých CT systému s vysokým rozlišením a v mnoha dalších badatelských oborech, jako jsou astronomie, částicová fyzika, atp. Navrhované řešení je zvláště využitelné ve scintilačních detektorech záření s různou hloubkou průniku ionizujícího záření.

20

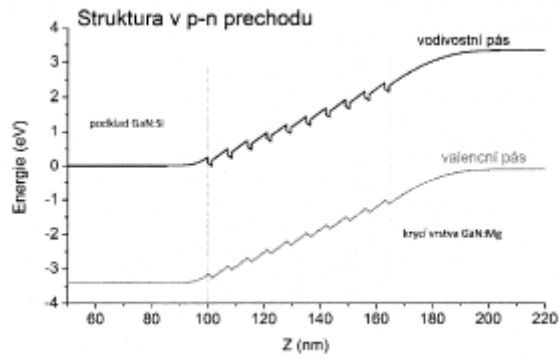
PATENTOVÉ NÁROKY

1. Scintilační detektor pro detekci ionizujícího záření, zejména elektronového, rentgenového nebo částicového záření, zahrnující monokrystalický substrát (1), na kterém je nanesena alespoň jedna podkladová vrstva (2) pro navázání alespoň jedné nitridové polovodičové vrstvy (3, 4, 5, 6) na substrát (1) pomocí epitaxe, alespoň jedna nitridová polovodičová vrstva (3, 4, 5, 6) je popsána obecným vzorcem $Al_yIn_xGa_{1-x-y}N$, kde platí $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$ a $0 \leq x+y \leq 1$, přičemž alespoň dvě nitridové polovodičové vrstvy (3, 4, 5, 6) jsou uspořádány do vrstvené heterostruktury, jejíž struktura obsahuje alespoň jednu vrstvu (5) potenciálové jámy pro zářivé rekombinace elektronů a děr, kdy na podkladové vrstvě (2) je uspořádána alespoň jedna spodní vrstva (3) s n–typovou dotací, nad spodní vrstvou (3) je uspořádána aktivní oblast heterostruktury sestávající z alespoň jedné aktivní dvojice nitridových polovodičových vrstev (4, 5) složené z bariérové vrstvy (4) typu $Al_{y_b}In_{x_b}Ga_{1-x_b-y_b}N$ a z vrstvy (5) potenciálové jámy typu $Al_{y_w}In_{x_w}Ga_{1-x_w-y_w}N$, pro které platí $x_b \leq x_w$ a $y_b \geq y_w$, přičemž je ve směru od substrátu (1) nad nejvýše se nacházející aktivní dvojicí vrstev (4, 5) uspořádána alespoň jedna vrchní nitridová polovodičová vrstva (7), **vyznačující se tím**, že na alespoň jedné straně aktivní oblasti a/nebo uvnitř aktivní oblasti je vložena alespoň jedna vrstva (6) s gradovaným složením pro snížení potenciálové bariéry a usnadnění migrace elektronů a děr do aktivní oblasti heterostruktury, která sousedí s vrstvou (5) potenciálové jámy, její tloušťka (d_3) je menší než 5 nm a její složení se mění ve směru k vrstvě (5) potenciálové jámy z obecného vzorce $Al_{y_p}In_{x_p}Ga_{1-x_p-y_p}N$ na obecný vzorec $Al_{y_g}In_{x_g}Ga_{1-x_g-y_g}N$, přičemž platí že $x_g \leq x_w$ a $y_w \leq y_g$.
2. Scintilační detektor podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vrstva (6) s gradovaným složením má plynule se měnící složení.
3. Scintilační detektor podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že složení vrstvy (6) s gradovaným složením se mění z GaN na $In_{0,03}Ga_{0,97}N$.

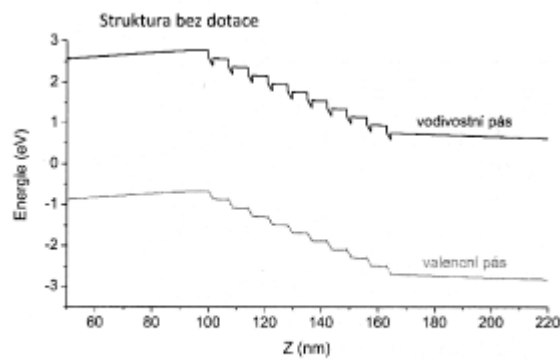
6 výkresů

Seznam vztahových značek

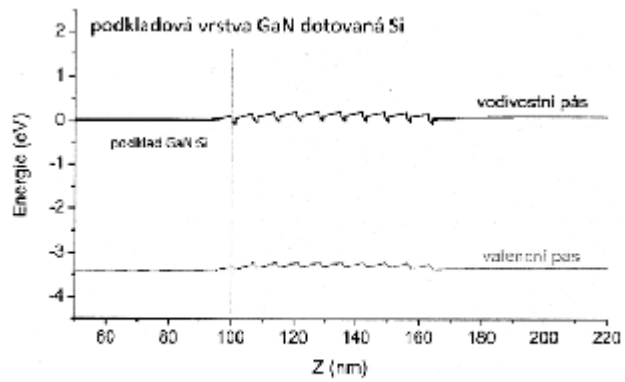
1	monokrystalický substrát
2	podkladová vrstva
3	spodní vrstva
4	bariérová vrstva
5	vrstva potenciálové jámy
6	vrstva gradovaným složením
7	vrchní vrstva
d_1	tloušťka vrstvy představující potenciálovou jámu
d_2	tloušťka bariérové vrstvy
d_3	tloušťka vrstvy s gradovaným složením
t_1	tloušťka spodní nitridové vrstvy
t_2	tloušťka vrchní nitridové vrstvy
t_4	tloušťka podkladové vrstvy
h	tloušťka aktivní části heterostruktury



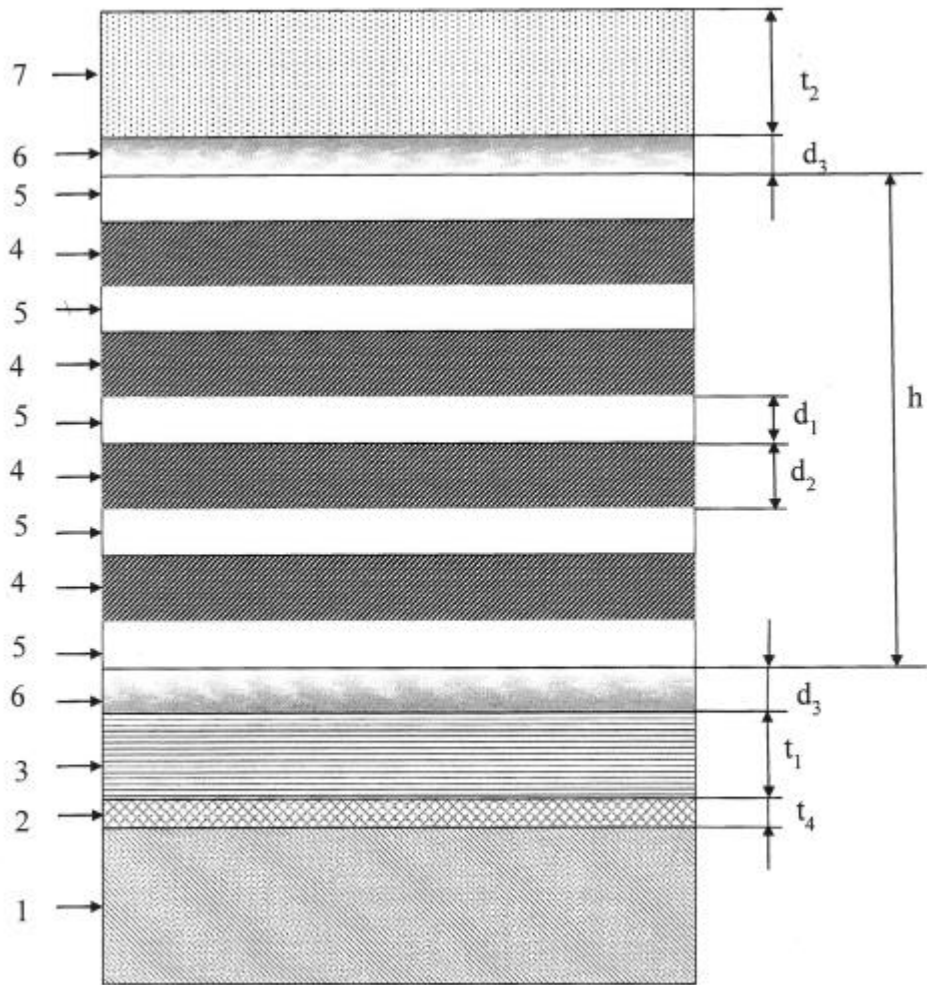
Obr. 1(a)



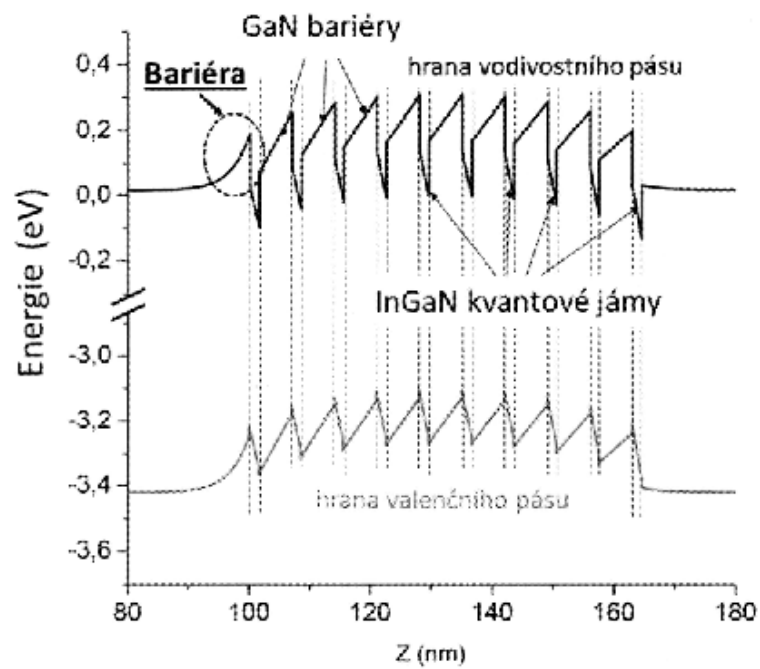
Obr. 1(b)



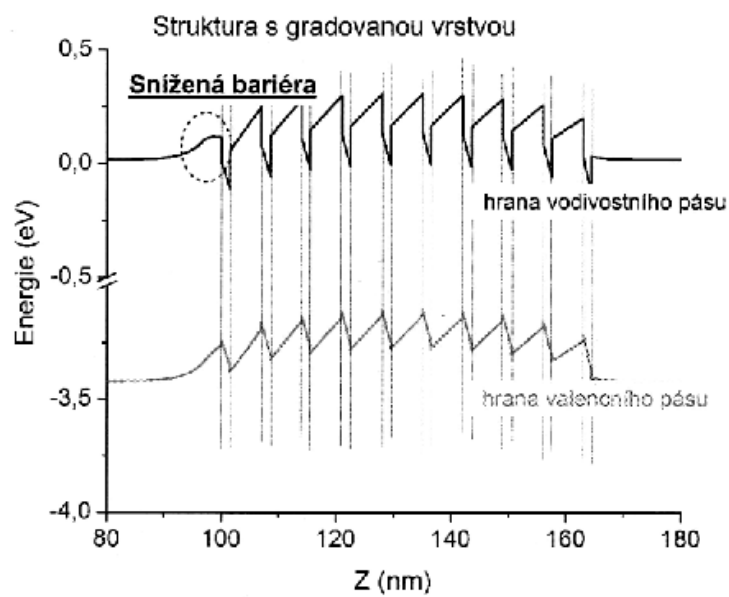
Obr. 1(c)



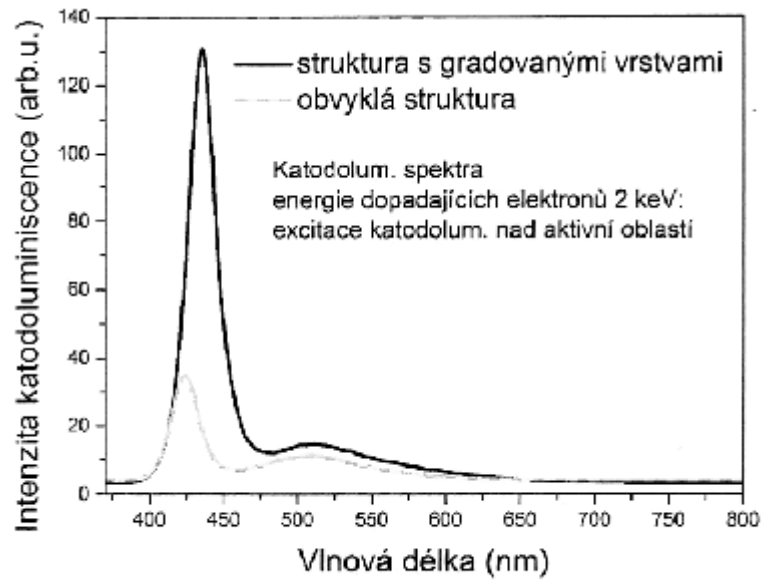
Obr. 2



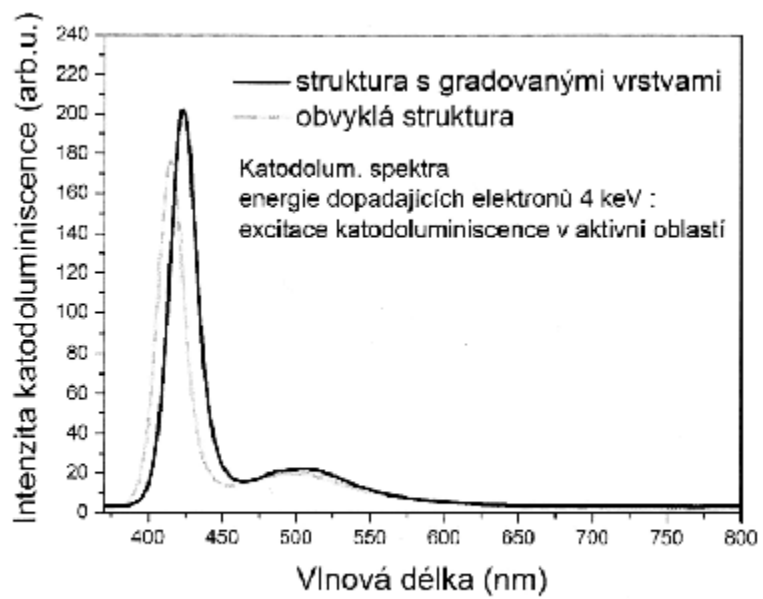
Obr. 3(a)



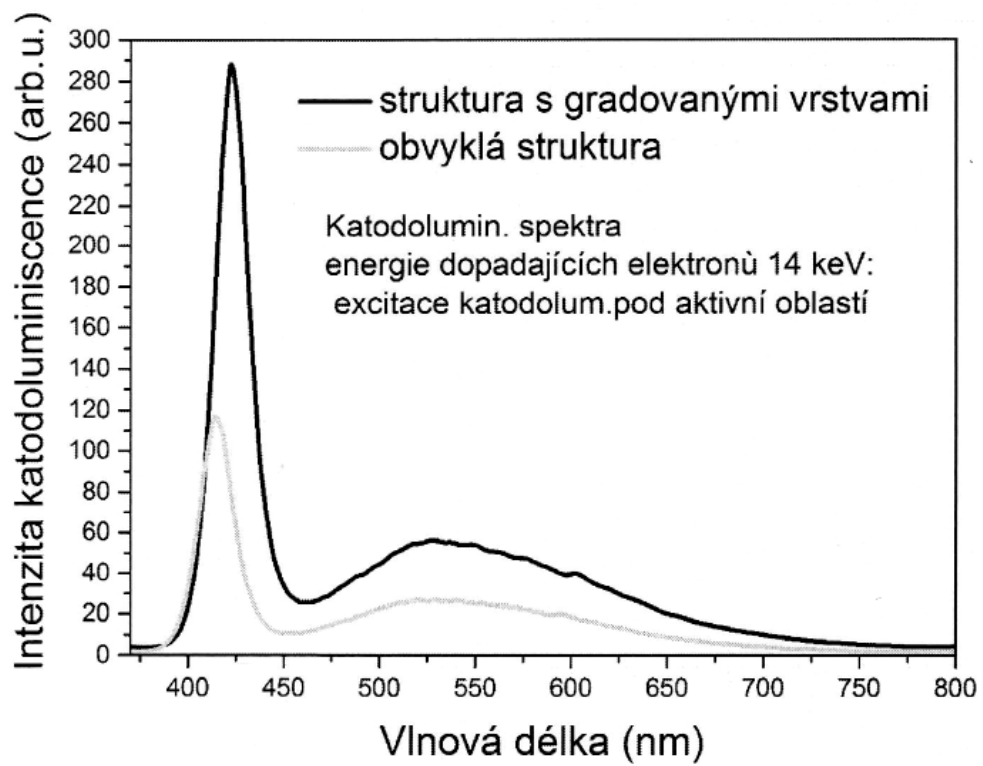
Obr. 3(b)



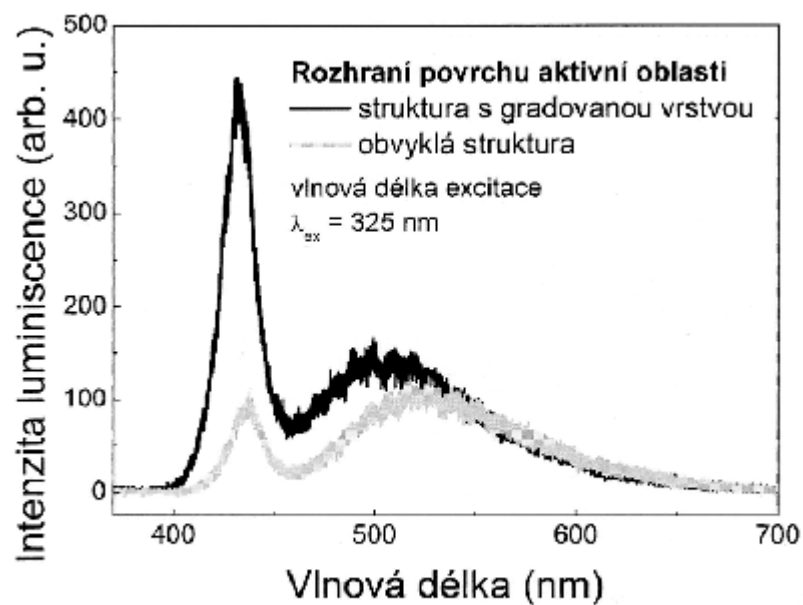
Obr. 4(a)



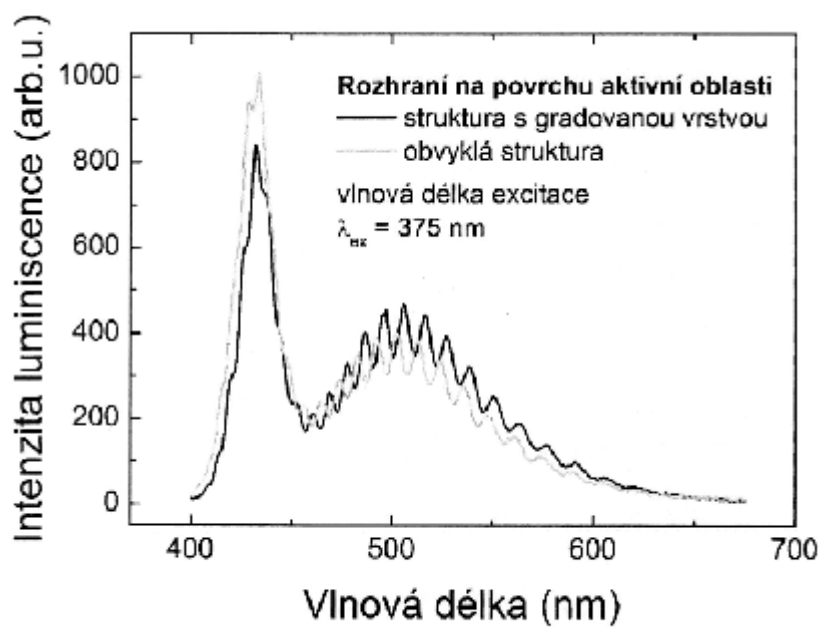
Obr. 4(b)



Obr. 4(c)



Obr. 5(a)



Obr. 5(b)