

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Eduard Hulicius; Tomislav Šimeček
Nobelova cena za fyziku 2000

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 46 (2001), No. 1, 1--7

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141056>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2001

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nobelova cena za fyziku 2000

přesněji její polovina, za polovodičové heterostrukтуры

Eduard Hulicius a Tomislav Šimeček, Praha

V oficiální tiskové zprávě o udělení Nobelovy ceny za fyziku stojí, že cena byla udělena vědcům a vynálezčům, kteří svou prací položili základy moderních informačních technologií. Zvláště za jejich příspěvek v oblasti rychlých tranzistorů, laserových diod a integrovaných obvodů. O první polovinu ceny se stejnou měrou dělí ZHORES I. ALFEROV a HERBERT KROEMER, získali ji za vyvinutí polovodičových heterostruktur používaných ve vysokofrekvenční elektronice a optoelektronice. Druhou polovinu získal JACK S. KILBY za svůj podíl na vynálezu integrovaného obvodu.

*Ve zdůvodnění udělení první části ceny se mimo jiné dočteme: „Aby byly moderní informační systémy prakticky použitelné, musí být splněny dva jednoduché požadavky. Musí být **rychlé**, aby bylo možné rychle přenášet velké objemy informací, a musí být **malé**, aby se mohly používat v kancelářích i doma a aby se vešly do kapsy nebo do aktovky.“ Laureáti navrhli a vyvinuli rychlé opto- a mikroelektronické prvky založené na vrstevnatých polovodičových strukturách, nazývaných polovodičové heterostrukтуры.*

Udělení druhé části ceny Jacku S. Kilbymu je zdůvodněno zhruba takto: „Díky tomuto vynálezu se mikroelektronika stala základem celé moderní techniky.“

Na rozdíl od autorů informace o minulé a předminulé Nobelově ceně za fyziku [1, 2], kdy šlo o mimořádně složitá a bezprostřední aplikaci vzdálená témata, máme nyní při popisu podstaty objevu mnohem snazší úlohu. Nápady, za které byla cena udělena — vývoj a uplatnění vrstevnatých polovodičových struktur nazývaných „heterostrukтуры“ a myšlenka integrace všech aktivních i pasivních součástí elektronických obvodů na jednom čipu, byly poměrně jednoduché, ale účinné. A jak to tak už u podobných nápadů bývá, s důsledky realizace těchto nápadů se dnes setkáváme úplně všichni a denně.

Tato Nobelova cena na sebe nechala dost dlouho čekat. Nešlo totiž o zcela nové fyzikální objevy v oblasti polovodičů. Ty byly Nobelovou cenou odměněny již dávno, v roce 1956 byla udělena za objev tranzistorového efektu — W. B. Shockley, J. Bardeen a W. H. Brattain, v roce 1964 za fundamentální práce vedoucí ke konstrukci laserů (i polovodičových) — N. G. Basov, A. M. Prochorov a Ch. H. Townes. Dokonce i některé fyzikální objevy, jejichž realizace si vyžadovala kvalitní heterostrukтуры, byly již Nobelovou cenou oceněny, v roce 1985 za objev kvantového Hallova jevu — Klaus

Ing. EDUARD HULICIUS, CSc. (1948), (e-mail: hulicius@fzu.cz), a RNDr. TOMISLAV ŠIMEČEK (1936), (e-mail: simecek@fzu.cz), Fyzikální ústav AV ČR, Oddělení polovodičů, Cukrovarnická 10, Praha 6.

von Klitzing (změřeného na vzorcích připravených G. Dordou, který působil do konce šedesátých let v ÚFPL-ČSAV) a nedávno, v roce 1998 — R. B. Laughin, H. L. Stormer a D. C. Tsui za zlomkový kvantový Hallův jev (na vzorcích od A. Gossarda). Částečně se heterostruktur vlastně týká i cena z roku 1973, udělená za vysvětlení tunelových jevů v polovodičích — L. Esaki, I. Giaever a B. D. Josephson.

Letos se Švédská královská akademie rozhodla odměnit teoretika (Herberta Kroemera), technologa-experimentátora (Zhorese Ivanoviče Alferova) a pracovníka aplikovaného výzkumu (Jacka S. Kilbyho) a přiklonila se z „výšin základních objevů“ a od složitých teoretických modelů fyzikálních jevů k poměrně jednoduché myšlence, která má však mimořádný praktický dopad. Nyní se dostalo i na toho, kdo se také přímo na přípravě struktur podílel, minule Gerhard Dorda (1985) i Arthur Gossard (1998) ocenění nebyli.

Trocha historie

Teoretické studie o vlastnostech polovodičů, které souvisí s oceněnými aplikacemi, jsou dokonce již z třicátých let. Návrhy, jak využít heterostruktury v elektronice, pocházejí například také od W. B. Shockleyho a A. I. Gubanova. Nejúplnější řádně publikované teoretické studie, správně předvídající mimořádně vysokou účinnost injekce nositelů náboje v heterostruktuře ve srovnání s homopřechody, uveřejnil v roce 1957 [3] právě HERBERT KROEMER.

Ideu zavedení dvojitě heterostruktury do konstrukce polovodičových laserů, která slibovala a skutečně později i umožnila jejich reálné využití, publikoval také H. KROEMER v roce 1963 [4] a nezávisle, o něco dříve, ale v „nepublikovaném“ patentu ZH. I. ALFEROV [5].

Realizace polovodičových laserů pracujících kontinuálně při pokojové teplotě byla publikována nezávisle a téměř ve stejnou chvíli I. Hayashim, M. B. Panishem a ZH. I. ALFEROVEM (1970, květen) [6]; Alferov odeslal svoji práci k publikaci o něco dříve, ale vyšla nejdříve rusky a anglicky až později.

Profesor Alferov až dosud řídí práce i v mnoha dalších oblastech výzkumu a vývoje heterostrukturních polovodičových systémů, často se světovými prvenstvími. Pracovníci jeho ústavu (Fyzikálně-technický ústav Ruské akademie věd v Petrohradu) přispěli řadou originálních prací k rozvoji technologie i teorie heteropřechodů. Dalším místem zabývajícím se studiem heterostruktur bylo velmi kvalitní pracoviště ve Fyzikálním ústavu Ruské akademie věd v Moskvě. Měli jsme možnost pracovat v šedesátých a sedmdesátých letech také na tomto pracovišti. „Čistší“ fyzikální zaměření moskevského pracoviště však vedlo k tomu, že se technologie rozvíjela jinde, v menších městech mimo Moskvu. Jak se ukázalo, byla to chyba, neboť spojení technologie přípravy, experimentu a silných teoretických skupin v laboratořích Alferova se projeвило jako plodnější.

Jaká bude budoucnost Alferovova pracoviště, je otevřená otázka, neboť odchody nejlepších lidí do zahraničí nebo za penězi jsou samozřejmě na práci a výsledcích ústavu znát. Mnoho dobrých vědců však na tomto relativně velmi dobře přístrojově

vybaveném pracovišti s dobrým jménem zůstává. Někteří se z ciziny vracejí a co hlavně, kontakty s těmi, kdo se etablovali v zahraničí, nejsou nyní přervány, naopak tito lidé umožňují studijní pobyty svým bývalým kolegům. Nynější Nobelova cena samozřejmě zvýší prestiž pracoviště a určitě přiláká i nové studenty.

Zh. Alferov strávil na našem pracovišti v Cukrovarnické ulici, v oddělení prof. Tauce, hlavně v technologické laboratoři u dr. Šmirouse, v Ústavu technické fyziky (nyní Fyzikální ústav) koncem padesátých let řadu měsíců v rámci své první zahraniční stáže. Pochytil zde mnoho právě z technologie sloučeninových polovodičů vhodných pro konstrukci heterostruktur. Kontakty našeho pracoviště a spolupráce s ústavem v Petrohradu stále trvají, máme společné evropské i národní projekty, workshopy, mezinárodní konference, výměnné stáže a řadu společných publikací.

Také profesor Kroemer stále pracuje v oboru heterostruktur a nedávno vyšla jeho práce o využití klasických supravodičů ve spojení s heterostrukturami, shodou okolností stejnými jako ty, které právě připravujeme a studujeme na našem pracovišti.

Podstata nápadu

Na rozdíl od poměrně složitých fyzikálních principů činnosti **polovodičových laserů** jde o velmi jednoduchý nápad, jak pomocí heteropřechodů mezi různými polovodičovými materiály vytvořit potenciálové bariéry pro nositele náboje, tím lokalizovat elektrony a díry, a tak výrazně zmenšit oblast, kde musí vzniknout inverze populace elektronových stavů, nutná pro činnost laserů. Současně díky různým indexům lomu materiálů heterostruktury vznikne ve stejném místě i účinný světlovod pro generované záření.

Realizace těchto myšlenek vedla k tomu, že z původních fyzikálních kvantových hříček, fungujících pouze při extrémně nízkých teplotách (pod 77 K), v impulsním režimu a při velmi vysokých proudových hustotách (10^5 A/cm²) a degradujících během několika sekund, se polovodičové lasery staly spolehlivými součástkami, které se nyní používají pro širokopásmové komunikace i ve spotřební elektronice.

V případě **vysokofrekvenčních** polovodičových heterostrukturních **součástek** jsou to nesmírně vysoké pohyblivosti nositelů náboje (v heterostrukturách víc než o dva řády vyšší než v objemových krystalech), které umožňují vyšší mezní modulační frekvenci než nejrychlejší křemíkové prvky. Vysokou pohyblivost elektronů umožňuje nejen lokalizace elektronů v heterostrukturní potenciálové jámě, ale i možnost prostorového oddělení legování.

Pro součástky zde uvedené je heterostruktura podmínkou funkce.

Jak definujeme heteropřechod a heterostrukturu

Heteropřechod je krystalograficky dokonalé spojení dvou různých polovodičů. Pro praktické využití bývá nutné, aby v okolí heteropřechodu bylo co nejméně defektů, hlavně dislokací. Pokud mají polovodiče různý typ krystalové mřížky, či se liší velikostí

mřížkové konstanty, je pak atomárně dokonalé spojení možné za cenu (často ale „s výhodou“) velkého pnutí na rozhraní, které ale nesmí vyvolat vznik dislokací. Ty by totiž způsobily nezářivou rekombinaci — zhoubnou pro luminiscenční součástky, snížily by pohyblivost elektronů ve vysokofrekvenčních tranzistorech a v obou případech by byly příčinou degradace součástek. K relaxaci nedochází, pokud je vrstva jednoho z polovodičů dostatečně tenká. Obvykle jde o jednotky, maximálně desítky nanometrů, v závislosti na rozdílu mřížkových konstant. Pnutí, ať tah či tlak, dosahující často GPa, může být i výhodné. Pokud se například změní pásová struktura tak, že se oddělí lehké díry od těžkých, součástky mohou být rychlejší. Kupodivu struktura i součástky zůstávají i s tímto pnutím stabilní a nedegradují.

Heterostruktura je tvořena několika heteropřechody za sebou. Využívá se toho, že fyzikální vlastnosti polovodičů, které tvoří heterostrukturu — například různá šířka zakázaného pásu nebo různý index lomu, umožňují vytvořit oblasti, které tvoří „potenciálové jámy“ pro elektrony a díry nebo světlovod pro fotony.

Speciální případ heterostruktury je **supermřížka**, kterou tvoří několik desítek až tisíc heteropřechodů vzdálených od sebe obvykle jen několik atomových rovin. Pokud je tato periodičita dostatečně přesná, vzniká vlastně umělý krystal nových, často předem zadaných vlastností. Je to čítankový příklad materiálového inženýrství.

Jak se heteropřechody připravují

Zcela zásadní pro přípravu heterostruktur jsou **EPITAXNÍ technologie** — přesněji epitaxní růst polovodičových vrstev, který umožňuje připravit:

1) Krystalograficky velmi dokonalé monokrystalické vrstvy, mnohem kvalitnější než například objemové krystaly rostlé z taveniny. To je dáno hlavně nižší teplotou při růstu vrstev.

2) Velmi tenké vrstvy, silné často jen jednu nebo několik atomových rovin, které jsou dokonalé nejen v objemu, ale jsou prosté defektů i na rozhraní.

Epitaxní technologie lze rozdělit podle média, ze kterého vrstvy vznikají, na:

- kapalnou epitaxi — **LPE** (Liquid Phase Epitaxy),
- plynnou epitaxi — **VPE** (Vapour Phase Epitaxy). Nyní je nejrozšířenější a nejvýznamnější plynná epitaxe z organokovových sloučenin **MOVPE** (MetalOrganic VPE). Technologie MOVPE se uplatňuje hlavně při vývoji nových materiálů a v průmyslu při hromadné výrobě složitějších struktur.

Svébytnou technologií je epitaxní růst z molekulárních svazků **MBE** (Molecular Beam Epitaxy).

MBE je hlavně výzkumná technologie a průmyslově se využívá pro výrobu velmi složitých heterostrukturálních systémů.

Kde se s heterostrukturami setkáváme

Polovodičové lasery. Jsou nezbytné pro optické vláknové komunikace, optické paměti (tím se rozumějí velkokapacitní optické počítačové paměti i CD přehrávače a vypalovače), laserové tiskárny, laserová ukazovátka, v medicíně pro diagnostiku i terapie a také pro nejrozmanitější vojenské a bezpečnostní využití. Heterostruktura umožnila vytvořit potenciálové bariéry pro elektrony a díry, a tak prostorově lokalizovat elektrony a díry (v případě heteropřechodů I. typu) a výrazně zmenšit oblast, kde musí vzniknout inverze populace energetických stavů elektronů. Současně díky různým indexům lomu různých materiálů heterostruktury můžeme vytvořit účinný světlovod pro generované záření a zajistit tak vyšší zisk i směrovost generovaného laserového záření.

Elektroluminiscenční diody — LED (Light Emitting Diodes). Kromě světelných indikátorů všech barev jsou dnes už k dispozici také LED displeje. Již několik let se používají třetí brzdo­vá světla v autech, spolehlivější a provozně levnější světla na semaforech osazená LED diodami. Je dost pravděpodobné, že žárovky i zářivky budou vytlačeny úspornějšími a spolehlivějšími elektroluminiscenčními polovodičovými heterostrukturálními diodami, kdy se ze tří barev složí barva bílá. Významnou perspektivu mohou mít LED diody ve velkoplošných obrazovkách. Pomocí heterostruktur se v případě LED:

- zlepšila kvantová účinnost konverze energie — díky omezení oblasti, kde dochází k rekombinaci,
- zvýšila vnější účinnost výstupu světla — vzhledem k možnosti použití různých indexů lomu a materiálů průsvitných pro generované světlo,
- rozšířilo barevné spektrum emitovaného záření — používáním materiálů s různými šířkami zakázaného pásu.

Polovodičové detektory nejrůznějších typů záření jsou díky heterostrukturám účinnější, citlivější a vhodné pro větší rozpětí vlnových délek. Zde se, podobně jako v případě fotovoltaických slunečních článků, využívá to, že lze využitím heterostruktury nezávisle zvolit materiál, v němž je záření absorbováno a kde se z generovaných nositelů vytváří výstupní signál.

Sluneční fotovoltaické články. Navzdory mnohaletému vývoji slunečních fotovoltaických článků na křemíku se ukázaly i zde heteropřechody jako zřetelně lepší řešení. Umožňují využít širší část slunečního spektra vytvořením kaskády článků citlivých v různých částech spektra na sobě a dosáhnout vyšší účinnosti pomocí lepší separace nerovnovážných nosičů náboje zřetelně nad 30 %, s teoretickým výhledem na 40 %. Nevýhodou je však podstatně vyšší cena takových článků, což nehraje roli v případě aplikací v kosmu, kde je důležité, „kolik váží kilowatthodina“. Pro terestriální použití bylo třeba vyvinout články, které je možno provozovat s koncentrátory slunečního záření např. v režimu 500 až 1000 sluncí. Přesto však z hlediska ekonomického nejsou heterostrukturální fotočlánky na zemi pro křemík zatím vážným konkurentem.

Vysokofrekvenční polovodičové součástky, hlavně výkonové vř tranzistory (HEMT — High Electron Mobility Transistor) s vysokou pohyblivostí elektronů umožněnou

právě heterostrukturou, mají dnes ze všech heterostrukturních součástí ekonomicky největší využití. Pracují v mobilních telefonech, ve vysokofrekvenčních komunikačních technologiích, používají se pro satelitní navigaci atd. Ve vysokofrekvenční elektronice je převaha součástí s heteropřechody, 2D elektronovým plynem, delta legováním apod. natolik výrazná, že z ultravysokofrekvenčních aplikací (jako jsou např. mobilní telefony, satelitní komunikace apod.) křemík zcela vytlačily.

Heterostrukтуры např. na bázi GaAs/GaAlAs, vhodné pro realizaci kvantového Hallova jevu, se používají v metrologii pro realizaci velmi přesných **normálů odporu a kapacity**, které jsou odvozeny pouze ze základních fyzikálních konstant.

Kvantové tečky jsou dalším případem moderního využití heterostruktur. V tomto případě jsou nosiče náboje uzavřeny nejen v ploše, jak je tomu u vrstevnatých heterostruktur. Zde jsou omezeny ve všech třech dimenzích, což vede ke zlepšení řady parametrů. Dnes mají polovodičové lasery s kvantovými tečkami rekordní parametry a patrně se brzy dočkáme jejich výroby.

Lasery, ve kterých dochází ke generaci fotonů při přeskoku elektronů mezi energetickými subpásky (nikoliv mezi vodivostním a valenčním pásem), se nazývají **kaskádové „intersubband“ polovodičové lasery**. Byly realizovány s využitím heterostruktur již v roce 1994 a do výroby přijdou patrně až letos, neboť jde o mimořádně složitou strukturu s neobyčejně vysokými požadavky na přesnou tloušťku a složení jednotlivých vrstev. Jde zřejmě o nejkomplicovanější průmyslově vyráběnou součástku — skládá se z více než tisíce vrstev. Lasery emitují ve střední infračervené oblasti a průchod jednoho elektronu strukturou generuje mnoho fotonů.

Termofotovoltaika — používají se heterostrukтуры z materiálů s užším E_g . Elektrická energie se získává z tepelného infračerveného záření. Vzhledem k vhodné šířce zakázaného pásu se používají hlavně polovodičové sloučeniny na bázi antimonidů.

Zatím se pro počítače málo využívají **mikroprocesory** na bázi GaAs heterostruktur. V principu by měly být rychlejší, výkonnější i odolnější než podobné na bázi křemíku a asi pouze jejich zatím vyšší cena způsobila krach čtyř z pěti existujících „GaAs“ počítačových firem.

Poznámka k aplikacím

Opravdu komerčně použitelné polovodičové lasery s dostatečně dlouhou životností byly ovšem už připraveny na jiných, lépe vybavených a aplikačněji zaměřených pracovištích, než měli k dispozici Kroemer a Alferov. Dalšího pronikavého zlepšení parametrů laserů se dosáhlo oddělením oblasti, kde dochází k inverzi populace nositelů náboje (elektronů a děr) od vlnovodu, ve kterém již generované fotony (které jsou mnohem „větší“ než elektrony) stimulují emisi dalších identických fotonů. Toto oddělení elektronů od fotonů umožňuje podstatné zmenšení oblasti, kde je třeba vytvořit podmínky inverze populace, a tím se mohou snížit budící prahové proudy — toto už navrhli a řešili jiní, ale opět pomocí heterostruktur. Také bylo samozřejmě nutné

vyřešit problémy s životností laserů hlavně odstraněním defektů z aktivní oblasti, ale také snížením proudového a teplotního zatížení součástek — znovu s přispěním heterostruktur.

Výběr laureátů nebyl jistě jednoduchý, neboť struktury dnes používané v popisovaných aplikacích jsou již mnohem složitější a o jejich vývoj se zasloužila řada dalších badatelů. Určit skutečné autory těch prvních prapůvodních nápadů také nebývá jednoduché. Jisté je, že letošní držitelé Nobelovy ceny byli v pravý čas na pravém místě, měli ty správné nápady a včas je publikovali.

L i t e r a t u r a

- [1] HOŘEJŠÍ, J., HOŠEK, J.: *Nobelova cena za fyziku 1999*. Pokroky MFA 45 (2000), 1–6.
- [2] STŘEDA, P.: *Kvantové Hallovy jevy*. Pokroky MFA 44 (1999), 177–186.
- [3] KROEMER, H.: *Quasi-Electric and Quasi-Magnetic Fields in Non-Uniform Semiconductors*. RCA Review 18 (1957), 332.
- [4] KROEMER, H.: *A Proposed Class of Heterojunction Injection Lasers*. Proc. IEEE 51 (1963), 1782.
- [5] ALFEROV, ZH. I., KHAZARINOV, R. F.: *Semiconductor laser with electric pumping*. Patent USSR N181737, March 30th (1963).
- [6] ALFEROV, ZH. I. a další: *Effect of the heterostructure parameters on the laser threshold current and the realization of continuous generation at room temperature*. Fiz. Tekh. Polupr. 4 (1970), 1826 (Sov. Phys. Semicond. 4 (1971), 1573);
HAYASHI, I., PANISH, M. B.: *Junction lasers which operate at room temperature*. Appl. Phys. Lett. 17 (1970), 109.

Monte Carlo podle Markova

Václav Dupač, Praha

1. Simulace náhodné veličiny

Ve statistické fyzice, v matematické statistice i v technice výpočtů se setkáváme s touto úlohou:

\mathcal{X} je konečná množina, X je náhodná veličina, která nabývá hodnot $x \in \mathcal{X}$ s vesměs kladnými pravděpodobnostmi π_x . Rozdělení pravděpodobností náhodné veličiny X označíme stručně π . Máme realizovat (simulovat) hodnotu náhodné veličiny X nebo

Prof. RNDr. VÁCLAV DUPAČ, DrSc. (1929), katedra pravděpodobnosti a matematické statistiky MFF UK, Sokolovská 83, 186 75 Praha 8, e-mail: dupac@karlin.mff.cuni.cz
Napsáno za podpory grantu GAČR 201/00/0770.