

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Štefan Višňovský; Milan Kučera
Perspektivy integrované optiky

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 23 (1978), No. 4, 197--202

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138570>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1978

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>

Perspektivy integrované optiky

Štefan Višňovský, Miroslav Kučera, Praha

Integrovaná optika je novým směrem techniky přenosu a zpracování zpráv využívající šíření světla v tenkovrstvých optických vlnovodech [1, 2, 7,10]; její rozvoj si vynucují rostoucí nároky na zvýšení šíře pásma a nosných kmitočtů sdělovacích zařízení. Praktickou realizaci obvodů integrované optiky umožňuje současný stav mikroelektroniky, technologie polovodičových laserů a tenkých vrstev. Po teoretické stránce vychází z mikrovlnné techniky; využití mikrovlnných principů na optických kmitočtech, tj. na kmitočtech o tři až pět řádů vyšších, s odpovídajícím zvýšením objemů přenášených informací znamená pokrytí rostoucích nároků rozvinuté průmyslové společnosti na dlouhá desetiletí dopředu.

Původní představy o integrované optice předpokládaly transformaci klasických optických systémů náročných na přesnou justaci a citlivých na mechanické otřesy i změny teploty do kompaktních tenkovrstvých obvodů vylučujících tyto nevýhody. Skutečně se postupně podařilo vytvořit tenkovrstvé protějšky těchto klasických prvků: zrcadel, čoček, mřížek, hranolů, elektrooptických, akustooptických a magnetooptických modulátorů a přepínačů i laserů. Tyto prvky navzájem propojené optickými vlnovody představují v principu opět optické vlnovody se specifickými funkcemi.

V prvních modelech integrovaných optických obvodů se počítalo se soustředěním prvků nejrůznějších typů a vytvořených z různých materiálů optimálních pro danou funkci na téže podložce. Technologické obtíže spojené s realizací obvodů obsahujících prvky z odlišných materiálů si však záhy vynutily změnu této koncepce. Současný vývoj směřuje k monolitickým integrovaným optickým obvodům soustřeďujícím na jediné podložce velké počty prvků dvou nebo tří typů (např. laser, vlnovod, přepínač) vhodně kombinovaných tak, aby zajistily všechny požadované funkce. Toto zaměření zužuje původně široké spektrum materiálů uvažovaných pro obvody integrované optiky na polovodiče třídy A^{III}–B^V.

Paralelně s rozvojem integrované optiky výrazně pokročila technologie optických vláken. Zdokonalení jejich přenosových parametrů na úroveň překonávající jak konvenční měděné kabely, tak vlnovody pro milimetrové pásmo a frekvenční kompatibilita polovodičových laserů s oblastmi optimální propustnosti těchto vláken (s minimem ztrát v okolí 0,85 μm a 1,05 μm) slibuje brzké využití integrované optiky v optických komunikacích.

Dále krátce objasníme princip činnosti některých prvků, jejich propojení do integrovaného optického obvodu s vyhlídkami integrované optiky do budoucna.

K základním funkcím integrovaného optického obvodu náleží generace koherentního záření, jeho vedení, modulace, popř. přepínání mezi několika kanály a detekce. V současné době existuje celá řada materiálů, v nichž se podařilo jednu nebo i více z těchto funkcí realizovat. Nejdůležitější jsou uvedeny v tab. I [3], z níž je zřejmé význačné

postavení polovodičů skupiny $A^{III}-B^V$, jejichž klasickým představitelem je systém GaAs/AlGaAs. Ostatní materiály uvedené v tabulce mají více méně jen historický význam – byly na nich prodemonstrovány základní funkce optického integrovaného obvodu a položeny tak základy pro rozvoj monolitické integrované optiky. Polovodiče $A^{III}-B^V$ jako jediné umožňují realizaci laserů buzených elektrickým polem schopných funkce ve spojitém režimu při pokojové teplotě, a to s životností řádu 10^5 hodin. Vedle systému AlGaAs/GaAs/AlGaAs pro oblast $0,85 \mu\text{m}$ se zkoumají systémy AlGaAsSb/GaAsSb/AlGaAsSb a InP/GaInPAs/InP pro vlnové délky nad $1 \mu\text{m}$ [4].

Základním prvkem integrovaného optického obvodu je dielektrický vlnovod, který je tvořen tenkou dielektrickou vrstvou tloušťky $\lesssim 1 \mu\text{m}$ vytvořenou na dielektrickém substrátu (vrstvý vlnovod), popř. pravoúhlým páskovým vlnovodem tloušťky $\lesssim 1 \mu\text{m}$ a šířky $2-3 \mu\text{m}$ (kanálový vlnovod), viz obr. 1. Všechny pasívní i aktivní optické prvky se pak realizují přímo v tomto vlnovodu.

Šíření světla vlnovodem si lze jednoduše představit jako sled totálních odrazů na jeho stěnách (obr. 3). Aby nedocházelo k lomu světla, je index lomu vlnovodu vždy větší než index lomu prostředí, která jej obklopují.

Záření musí přitom dopadat na stěny vlnovodu pod úhlem větším, než je kritický úhel pro úplný odraz.

Koherentní světlo se šíří vlnovodem ve formě diskretních módů. Zpravidla je žádoucí, aby se celá energie záření dané frekvence soustředila v základním módu. Vhodnou volbou tloušťky vlnovodu a profilu indexu lomu vlnovodu a okolí lze dosáhnout toho, aby pro módy vyšších řádů, (které dopadají na stěny pod nižším úhlem) nebyla splněna podmínka pro úplný odraz, čímž dochází k jejich vyzáření.

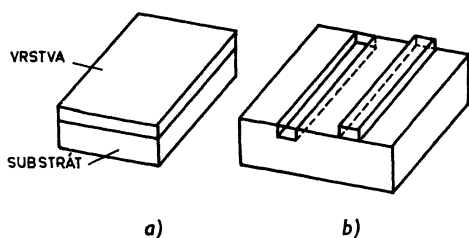
Tab. I. Základní materiály pro integrovanou optiku

materiál	struktura	optické ztráty	použití
polovodiče $A^{III}B^V$	monokrystalická	3 dB/cm (při $1,15 \mu\text{m}$)	injekční lasery, elektrooptické modulátory, vlnovody, pasívní prvky, detektory
granáty	monokrystalická	1 dB/cm (při $1,15 \mu\text{m}$)	opticky buzené lasery, nereziprokové prvky, magnetooptické modulátory, vlnovody, pasívní prvky
$\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$	monokrystalická	1 dB/cm (při $0,633 \mu\text{m}$)	elektrooptické a magnetooptické modulátory, vlnovody, pasívní prvky, nelineární jevy
ZnO	monokrystalické	2 dB/cm (při $0,633 \mu\text{m}$)	elektrooptické modulátory, vlnovody, pasívní prvky, nelineární jevy

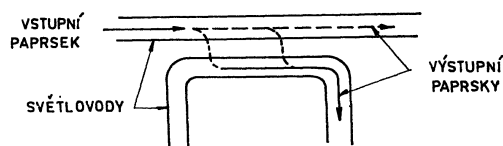
Pozn.: Jako vlnovody a pasívní prvky lze použít i amorfni skla a amorfni organické polymery, které vynikají velmi nízkými ztrátami (skla 0,5 dB/cm, polymery 0,1 dB/cm při $0,633 \mu\text{m}$)

Optický vlnovod má řadu rysů společných s kovovými vlnovody užívanými např. pro centimetrové pásmo. Liší se však v jednom směru velmi podstatně. V závislosti na profilu indexu lomu proniká u optického vlnovodu část elektromagnetické energie do jeho okolí. Tohoto jevu se hojně využívá pro vazbu mezi vlnovody, popř. pro jejich buzení. Schéma takové vazby je na obr. 2. Mezi dvěma paralelními vlnovody vzdálenými přibližně na délku vlny dochází k periodickému přenášení energie z jednoho do druhého. Změnou vzájemné vzdálenosti nebo délky oblasti, ve které dochází k vazbě, se dosáhne požadovaného rozdělení elektromagnetické energie mezi jednotlivé vlnovody. Této vazby mezi vlnovody lze velice výhodně využít pro modulaci světelné vlny procházející vlnovodem, popř. pro přepínání světla mezi kanály. Index lomu vlnovodu, tedy i pronikání elektromagnetické energie do jeho okolí lze měnit např. elektrooptickým efektem. Modulační elektrody jsou napařeny přímo na vlnovodech a výkonová spotřeba činí desetiný až setiný mW/MHz.

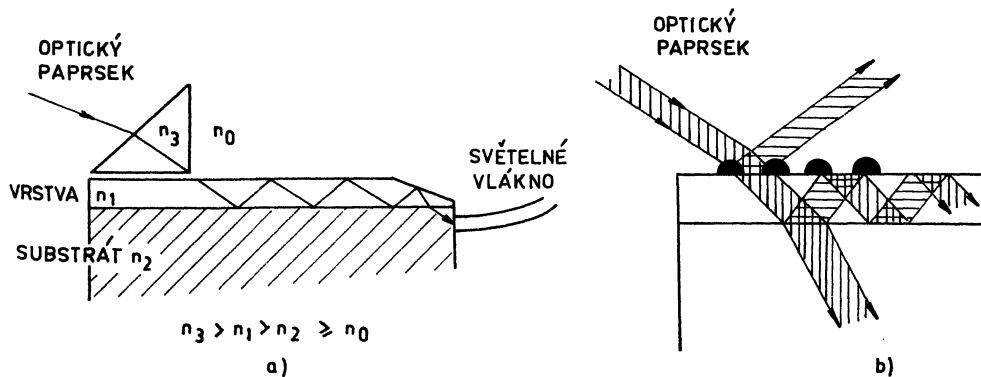
Optické vlnovody mohou být tvořeny rozličnými materiály, z nichž jmenujme alespoň epitaxní vrstvy GaAs, popř. s dotací Al, In, Sb, P apod. (mimořádně vhodné materiály pro monolitickou integraci), granátové epitaxní vrstvy, LiNbO₃, ZnO, vrstvy Ta₂O₅, skla, organické materiály atd.



Obr. 1. Dielektrický vlnovod;
a) vrstvý, b) kanálový.



Obr. 2. Optická vazba mezi dvěma vlnovody.



Obr. 3. Vazební prvky; a) vazební hranol a klínová vazba, b) vazební mřížka.

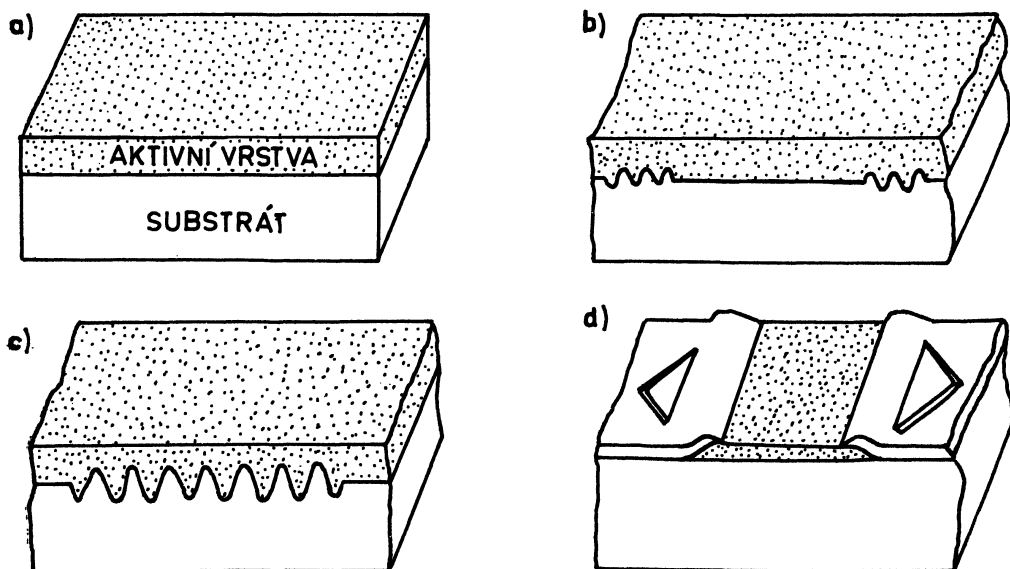
Pravděpodobně stále jedním z nejzávažnějších technologických problémů je účinný způsob zavedení světla z optického vlákna do vlnovodu. Dnes se již výhradně používají tzv. vazební prvky – hranoly, mřížky anebo klínové vazby. Princip těchto vazebních prvků je zřejmý z obr. 3. Z hlediska integrace přichází v úvahu pro praktické aplikace jedině mřížková vazba, popř. klínová vazba (pro výstup paprsku z vlnovodu do optického vlákna). Účinnost mřížkové vazby je ještě poměrně malá a dosahuje běžně asi 20 %.

Při návrhu tenkovrstvých struktur integrované optiky je třeba brát v úvahu okolnost, že materiál silně pohlcuje právě záření té vlnové délky, které je schopen emitovat. Pro optimální funkci je proto nutné vhodně měnit index lomu a šířku zakázaného pásu při dokonalém přizpůsobení mřížkových konstant sousedících vrstev. V případě laseru se ke snížení ztrát aktivní oblast – rezonátor (GaAs) – omezuje po obou stranách vrstvami $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ s větší šířkou zakázaného pásu a nižším indexem lomu (odtud název dvojitá heterostruktura). Takto se vedle dokonalejšího soustředění nosičů náboje do aktivní oblasti a snížení prahu buzení dosáhne i zesílení vlnovodového efektu a poklesu ztrát absorpcí v okolí rezonátoru.

V klasické dvojitě heterostruktuře (DH) podobně jako u obvyklých polovodičových laserů jsou čela rezonátoru tvořena štípáním monokrystalu v definované krystalografické rovině. Tvoří tak Fabryův-Perotův rezonátor (obr. 4a). Tloušťka aktivní vrstvy je asi $0,5 \mu\text{m}$, nicméně štípaná čela komplikují vazbu mezi laserem a optickým vlnovodem.

Zásadní význam pro konstrukci laserů slučitelných s tenkovrstvou technologií mají periodické struktury (mřížky) tvořené zpravidla fotolitograficky buď na dielektrickém vlnovodu, nebo na rozhraní mezi podložkou a vlastním vlnovodem. Byly popsány dva

Obr. 4. Různé laserové struktury pro integrovanou optiku [10]; a) laser se štípanými (leštěnými) plochami, b) laser s Braggovými reflektory, c) laser s rozloženou zpětnou vazbou, d) laser s hranolovými reflektory.



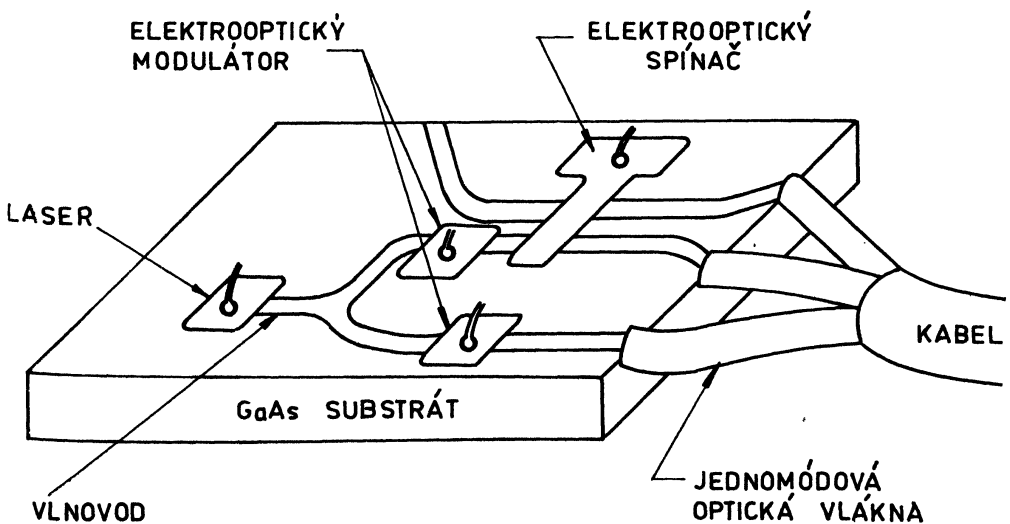
typy DH laserů s periodickými strukturami: laser s Braggovými reflektory a laser s rozloženou zpětnou vazbou. Jestliže mřížková konstanta periodické struktury je rovna polovině vlnové délky, dochází v aktivním prostředí k účinnému odrazu vlnění šířícího se vlnovodem (Braggův reflektor). Dvojice takových reflektorů nahrazuje zrcadla laseru se štípanými čely (obr. 4b). Laser s rozloženou zpětnou vazbou vzniká kombinací Braggových reflektorů do jednotné periodické struktury umístěné přímo v aktivní oblasti laseru (obr. 4c). Pro nejvýhodnější jednomódový režim laseru musí mřížka využívat první difrakční řád s periodou $0,115 \mu\text{m}$. To je technologicky velmi náročný problém; laser pracující v tomto uspořádání ve spojitém režimu při pokojové teplotě se nepodařilo zatím realizovat [5]. Jeho vyřešení má však pro budoucí uplatnění integrované optiky rozhodující význam. Pro úplnost je na obr. 4d uvedeno i řešení laseru s hranolovými reflektory.

Pokud jde o detektory záření pro integrovanou optiku, zdá se, že pro současnou polovodičovou techniku to bude mnohem menší problém než např. vývoj tenkovrstvého laseru. Prakticky na všech polovodičích, a tedy i na systému GaAs lze vytvořit p-n přechod v integrované formě. Nejlepší výsledky dávají sice křemíkové pin-diody, avšak pro monolitickou integraci bude nejvýhodnější systém InGaAs, který je dostatečně citlivý a rychlý v oblasti $0,85 - 1,05 \mu\text{m}$ [9].

Dosavadní technologie prvků pro integrovanou optiku těžila hlavně z postupů zavedených v křemíkové mikroelektronice. Vysoké nároky na přesnost (submikronové rozměry) a homogenitu složení při zachování vysoké přesnosti požadovaných geometrických tvarů obvodů si vynucují širší využití postupů nových, v první řadě iontové implantace, epitaxe molekulárním svazkem [6], elektronové litografie a holografické fotolitografie.

Integrovaná optika bude pravděpodobně nejdříve využita při konstrukci některých

Obr. 5. Schematický obrázek monolitického vysílače na bázi GaAs [8].



částí optických vysílačů a přijímačů autonomních systémů velkých letadel a lodí, kde v první fázi vytlačí rozšířené systémy mikrovlnné. V laboratořích firmy Texas Instruments byl vyvinut experimentální optický vysílač ve formě monolitického integrovaného obvodu na bázi GaAs [8], obr. 5. Tento vysílač obsahuje tenkovrstvý laser s výstupem do kanálových světlovodů, nezávisle ovládané modulátory a spínače a další pasívní prvky, umožňující optickou vazbu mezi jednotlivými částmi vzorku. Výstup z obvodu je napojen na jednomódová optická vlákna, která tvoří přenosový kabel. Šířka pásma je několik set megahertzů, spotřeba činí desetiny mW/MHz. Na tomto vzorku byly realizovány v podstatě všechny funkce požadované od integrovaného optického obvodu.

Nehledě na technologickou náročnost a řadu nedořešených problémů nejen v oblasti laserů, ale i modulátorů, spínačů, detektorů a v oblasti vazby obvodu na optická vlákna zůstávají integrované optické obvody v popředí zájmu. Očekává se, že se uplatní všude tam, kde půjde o zpracování velkých objemů informací, jejichž přenos si vynutí využití optických kmitočtů. Ohromná šířka pásma optických komunikačních kanálů umožní např. přímé napojení účastníků na centrální jednotky, ať už jde o připojení k počítači anebo o napojení na centrální informační centra, sklady, knihovny, zavedení obrazového telefonu, rozvod televize pomocí optických vláken (mimořádně již prakticky uskutečněný) atd.

Integrovaná optika jako perspektivní obor budoucnosti se začíná rozvíjet v řadě ústavů ČSAV, SAV a vysokých škol v ČSSR, mimo jiné i ve Fyzikálním ústavu Univerzity Karlovy, kde navazuje na tradiční optickou problematiku. Fyzikální ústav UK ve spolupráci s výzkumnými ústavu ČSAV a Tesla pořádal v roce 1976 v Mariánských Lázních mezinárodní letní školu o optoelektronice a integrované optice, na které vystoupili přední specialisté z ČSSR, SSSR a dalších socialistických zemí. Byly tak položeny dobré základy pro rozvoj této vědní disciplíny v Československu a pro mezinárodní kooperaci.

Literatura

- [1] T. TAMIR, Ed.: *Integrated Optics*, Topics in Applied Physics 6, Springer-Verlag, Berlin 1975.
- [2] V. PROSSER, Ed.: Proc. of the Summer School on Optoelectronics and Integrated Optics, M. Lázně, září 1976, Universita Karlova Praha 1976.
- [3] D. OSTROWSKY: *La recherche* 6, 740, 1975.
- [4] C. J. NUSEE, G. H. OLSEN, M. ETTEBERG, J. J. GANNON and T. J. ZAMEROWSKI: *Appl. Phys. Letters* 29, 807, 1976.
- [5] W. NG, H. W. YEN, A. KATZIR, I. SAMID, and A. YARIV: *Appl. Phys. Letters* 20, 684, 1976.
- [6] T. P. LEE and A. Y. CHO: *Appl. Phys. Letters* 30, 293, 1977.
- [7] A. G. CHYNOWETH: str. 28, *Phys. Today*, May 1976;
H. KRESSEL, I. LADANY, M. ETTEBERG, H. LACKWOOD: str. 38, *Phys. Today*, May 1976;
E. M. CONWELL: str. 48, *Phys. Today*, May 1976.
- [8] F. A. BLUM, J. C. CAMPBELL: Topical meeting on Integrated Optics, Jan. 1976, Salt Lake City.
- [9] J. P. NOBLANC: *Appl. Phys.* 13, 211, 1977.
- [10] P. K. TIEN: *Rev. Mod. Phys.* 49, 36L, 1977.