

Laser a jeho aplikácie – začiatky v Československu

Milan Držík

Medzinárodné laserové centrum, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava 4

Po päťdesiatich rokoch od zrodu lasera si už dnes len ťažko dokážeme predstaviť optické, ale vo všeobecnosti aj fyzikálne laboratórium bez tohto zdroja koherentného svetla. V princípe nie veľmi zložitý zariadenie, tak ako máloktorý iný prístroj, absorbovalo v sebe základné zákony a poučky vtedy ešte dosť teoreticky vyzerajúcej fyzikálnej oblasti – kvantovej mechaniky. Snáď nezaškodí zopakovať kľúčové momenty vývoja, ktoré v konečnom dôsledku zabezpečili možnosť, aby ostrý lúč monochromatického svetla vytryskol zo zostavy svetelných a optických komponentov, pre ktorú sa rýchlo ujal názov vytvorený z anglickej skratky – laser.

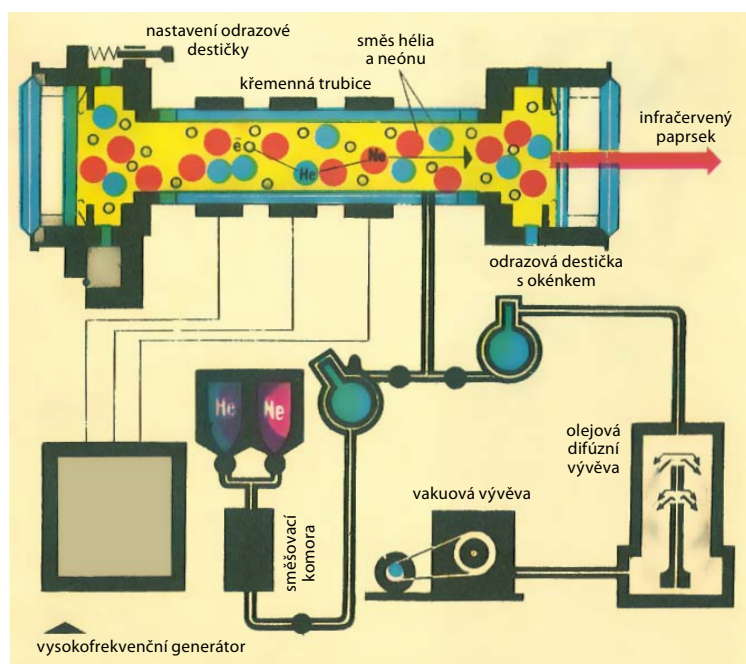
Základnou podmienkou činnosti laserov je dosiahnutie prevýšenia stimulovanej emisie nad emisíou spontánnou a absorpciou. Ako prvá kľúčová práca, ktorá vysvetľovala tieto fyzikálne javy, sa väčšinou spomína publikácia Alberta Einsteina z roku 1917 [1]. S odstupom času môžeme konštatovať, že tu boli položené základy fyziky kvantových zosilňovačov – maserov a laserov, aj keď pravda, úvahy v značnej miere vychádzali z vtedy už známeho Planckovho zákona. Jav zosilnenia svetla v systéme, kde sa na-

chádzajú excitované častice plynu, bol študovaný aj V. A. Fabrikantom v roku 1939 v jeho doktorskej dizertačnej práci [2].

Zosilnenie a generácia elektromagnetických vln sa v klasickej elektronike uskutočňuje v zosilňovači s kladnou spätnou väzbou, kde ako anódová záťaž slúži rezonančný LC obvod. Tesne pred druhou svetovou vojnou vznikli prvé radary, vyžadujúce výkonné mikrovlnné generátory, ktoré však nebolo možné klasickými obvodmi vytvoriť. Z hľadiska neskoršej realizácie myšlienky optického kvantového generátora je treba vidieť aj význam, ktorý mal dutinový rezonátor magnetronu. Práve dutinový rezonátor magnetronu, ktorý vznikol vo Veľkej Británii v r. 1940, zabezpečil prevahu anglických radarov nad nemeckými a realizácia mikrovlnného vyžarovania (3 GHz, t.j. vlnová dĺžka cca 10 cm) stála stratu neviditeľnosti nemeckých ponoriek plávajúcich pod hladinou s vysunutým periskopom, či tzv. schnorkelom privádzajúcim atmosférický vzduch k dieselovým agregátom ponorky pod hladinou v periskopovej hĺbke. Snaha generovať kratšie mikrovlny, aj keď žiaľ pre vojenské účely, viedla takto k uvedomeniu si dôležitosti vhodného rezonátora, čo bol jeden z faktorov pri vzniku kvantovej elektroniky po vojne.

Umiestnením vhodného média do dutiny rezonátora a jeho vybudnením vznikol prvý kvantový zosilňovač – maser. Stojaté vlnenie vytvorené v rezonátore masera zabezpečuje stimulovanú emisiu, t.j. proces, pri ktorom elektromagnetické vlny „správnej“ (rezonančnej) frekvencie stimulujú energetický preskok excitovaných atómov, prípadne molekúl, na nižšiu energetickú hladinu. Stálosť rezonančnej frekvencie možno využiť ako veľmi presný frekvenčný etalón (tzv. atómové hodiny), alebo ako citlivý zosilňovač. V tomto prípade slabé elektromagnetické vlnenie z antény veľmi citlivo ovplyvňuje vlnenie, ktoré vysielajú atómy. Konštrukčne bol maser riešený ako rezonančná dutina so silným magnetickým poľom, v ktorej bol uložený rubínový kryštál slúžiaci ako excitované médium.

Odtiaľto bol už len krok k vytvoreniu optického kvantového generátora – lasera. Ten vznikol vytvorením rezonátora realizovaného ako klasická schéma Fabryho-Perotovho interferometra s excitovaným aktívnym prostredím medzi jeho zrkadlami. Takto koncipovaný laser zostrojil Th. Maiman v laboratóriu vtedajšej „Hughes Aircraft Corporation“. Prvé záblesky svetla z tohto impulzného rubínového lasera



Obr. 1 Principiálna schéma prvého He-Ne plynového lasera. (Obrázok je prevzatý z VTM 25/1963).

1962/1963	čpavkové masery, frekvenčné štandardy VAAZ Brno, Ústav radioelektroniky ČSAV
začiatok r. 1962	konštrukcia plynového He-Ne lasera, nesvietil VAAZ Brno
9. apríla 1963	spustený prvý laser v Československu, neodýmový impulzný laser Fyzikální ústav ČSAV Praha, skupina Dr. K. Pátka
12. apríla 1963	rubínový laser Vojenský výzkumný ústav Praha, skupina Ing. J. Pachmana
18. júla 1963	spustený prvý polovodičový laser v Československu Ústav fyziky pevných látok ČSAV
18. októbra 1963	prvý čl. plynový He-Ne laser $\lambda = 1153$ nm, na jar 1964 $\lambda = 633$ nm Ústav prístrojové techniky ČSAV Brno, skupina Ing. F. Petrů

Tab. 1 Dátumy udalostí pri zrode lasera v Československu

sa objavili v roku 1960. Konštrukcia prvého plynového lasera sa spája s menami A. Javan, W. R. Bennet a D. R. Herriot, ktorí ako zdroj svetelného žiarenia (najprv v blízkej infračervenej oblasti) použili He-Ne výbojovú trubicu. Usporiadanie tohto lasera je na obr. 1, ktorý sme prevzali z vtedajšieho populárno-vedeckého časopisu Věda a technika mládeži [3]. Z nákresu je vidieť použitie plochých dielektrických zrkadiel z vnútornej strany výbojovej trubice, čo samozrejme obmedzovalo životnosť zrkadiel. Výboj v trubici dlhý cca 80 cm sa budil vysokofrekvenčne na frekvencii 28 MHz. Výkon žiarenia bol niekoľko mW v kontinuálnom móde.

Inžinierska a laboratórna prax, ale aj priemysel, zareagovali na tento objav začiatkom 60. rokov neobyčajne pružne a už o niekoľko rokov bolo na trhu niekoľko typov laserových zdrojov impulzných i plynových. Je zaujímavé, že vo výskumných ústavoch vtedajšieho Československa pracovalo viacero odborníkov, ktorí okamžite rozpoznali dôležitosť nástupu laserových technológií, a vďaka nim sa už v roku 1962 pracovalo na vývoji optického kvantového generátora. Prvé úspešné experimenty s generovaním svetla sa uskutočnili v apríli 1963 vo Fyzikálnom ústave ČSAV a vo Vojenskom výskumnom ústave Praha. Tieto dátumy svedčia, že vtedajšia ČSSR sa stala štvrtým štátom sveta, kde sa podarilo realizovať laserové generovanie svetla. V tabuľke 1, ktorá bola vytvorená na základe informácií z časopisu VTM a monografie V. Sochora [4], sú zhrnuté najdôležitejšie dátumy.

K tomu je treba podotknúť, že taká rýchla odozva našich vtedajších výskumných inštitúcií nebola náhodná. Tradície i skúsenosti českého priemyslu jemnej mechaniky i optických výrobcov a pražská a olomoucká škola, ktoré vychovávali odborníkov v tejto oblasti, tu zrejme zohrali veľmi pozitívnu úlohu. Veľmi rýchlo sa tiež zhostila výroby laserových zdrojov vtedajšia Tesla – Výzkumný ústav vakuové elektrotechniky, ktorá rozbehla výrobu plynových laserov (tab. 2) ale aj impulzných laserov s kryštálom rubínu (tab. 3) [5]. Monokrystály Turnov, kde je potrebné spomenúť aspoň Ing. J. Súlovského a Ing. Z. Cuchého, vyvinuli technológie, ktorými boli schopné vyrábať Verneuilovou aj Czochralského metódou rubínové kryštály dobrej kvality.

Označenie	Výkon (mW)	Vlnová dĺžka (nm) Režim	Určenie možností použitia
TKG 201 (He-Ne)	1,5	632,8 mnohomódový	Laboratórne meranie, pre demonštračné účely
TKG 202 (He-Ne)	3	632,8 TEM ₂₂ a nižšie módy	Vytyčovací práce v geodézii, stavebníctvo, strojárstvo
TKG 203 (He-Ne)	6	632,8 TEM ₀₀	Interferometrické merania, holografia
TKG 241 (CO ₂)	50.10 ³	10600 mnohomódový	Technologické účely
TKG 221 (Ar)	0,5-1.10 ³	457,9 476,5 488 496,5 501,7 TEM ₀₀	Holografia, interferometrické merania

Tab. 2 Prvé typy plynových laserov vyvinuté a vyrábané v Tesle VÚVET Praha

V špecifickej situácii bola vtedy na Slovensku oblasť laserových technológií aj optiky. Bez zodpovedajúcej tradície v tejto oblasti, z vysokých škôl začali začiatkom 60. rokov prichádzať do praxe prví absolventi s vhodným vzdelaním a vytvorili sa tiež niektoré výskumné a vzdelávacie inštitúcie. Koncom 60. rokov sa optika rozvíjala v Slovenskej akadémii vied (Ústav merania, Ústav stavebníctva a architektúry), na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave (Katedra optiky), na Strojníckej fakulte SVŠT v Bratislave (Katedra fyziky), Vysokej škole poľnohospodárskej v Nitre, Vysokej škole lesníckej a drevárskej vo Zvolene a tiež v Metrologickom ústave v Bratislave. Neskôr sa vo Výskumnom ústave mechanizácie a automatizácie pracovalo na vývoji výkonného CO₂ lasera pre účely obrábania v strojárstve.

Laserové zdroje svetla, ktoré boli relatívne prístupné, podmienili rozvoj aplikácií laserových technológií. Určujúcim v tomto smere bolo vtedy na Slovensku smerovanie k využitiu holografie i speckle interferometrie najmä pre účely experimentálnej mechaniky. Holografia pre účely interferometrických meraní bola prvýkrát navrhnutá v práci [6] v roku 1965. Po prvom nadšení z interferenčných čiar vznikajúcich pri dvojexpozícii dvoch stavov objektu na jeden hologram, objavil sa problém správnej interpretácie. Interferogramy totiž vznikali aj na difúzne odrážajúcich objektoch, čo klasická interferometria dovtedy nepoznala.

Typ lasera	Výstupná energia alebo výkon	Dĺžka impulzu	Oblasť použitia
2000L	0-0,5 J	1 ms	Univerzálny laboratórny typ, Laser-mikroskopy
QU 2000L	max. 10 MW	50 ns	Univerzálny laboratórny typ
TKG 101	0-5 J	0,5-5 ms	Technologické aplikácie, spektrálna mikroanalýza
QU TKG 101	max. 50 MW	50 ns	Dížkomery
TKG 102	0-0,3 J	1 ms	Očné koagulatory, Laser-mikroskopy
TKG 103	30 J	2-5 ms	Technologické aplikácie, Lekárske aplikácie

Tab. 3 Prvé typy impulzných pevnolátkových laserov, ktoré boli vyrábané v Tesle VÚVET

» Laserové zdroje svetla podmienili rozvoj aplikácií laserových technológií. «

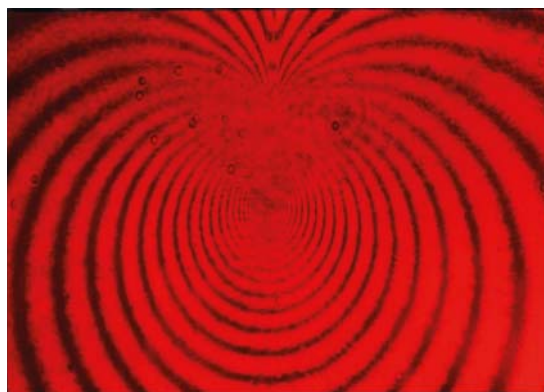


Obr. 2 Obrázok interferenčných čiar rovnakej zmeny hrúbky (izopachických čiar) v bezprostrednom okolí špičky trhliny pri jej mechanickom namáhaní.

Z hľadiska fyzikálnej interpretácie sa v tomto smere kľúčovou stala práca Alexandrova a Bonč-Brujeviča [7] z roku 1967. V práci bola dokázaná hypotéza, že rozptyl-difrakcia svetla na difúzne odrážajúcom povrchu nastáva tak, akoby sledovaný bod povrchu odrážal svetlo v ľubovoľnom vybranom smere pozorovania. To znamená, že môžeme použiť aj v danom smere princíp dráhového rozdielu, podobne ako v klasickej interferometrii, ktorá to bola schopná uskutočniť iba v smere zrkadlového odrazu či transparentného prechodu. Ďalším dôležitým fyzikálnym momentom je, že v blízkosti pozorovaného bodu v rámci jemu prislúchajúcej laserovej škvرنy – speckle, je svetlo priestorovo koherentné, t.j. svetlo z tejto oblasti rekonštruované z dvoch expozícií hologramu môže navzájom interferovať. Inak povedané, v rámci rádiusu korelácie, čo je vlastne veľkosť speckle, sa realizuje samostatný interferometer.

Tematika využitia optických metód v experimentálnej mechanike sa rozvíjala už od polovice 60. rokov aj v Ústave stavebníctva a architektúry Slovenskej akadémie vied. V spolupráci s optickým oddelením v Ústave merania SAV sa vyvinul interferometer so šesťpalcovým zorným poľom (boli navrhnuté a vybrúsené korigované teleskopické objektívy s daným priemerom), ktorý využíval nekoherentný zdroj s použitím monochromatického a priestorového filtra. Podobne ako vo fotoelasticimetrii, aj tu sa merali deformácie hrúbky transparentných modelov (z PMMA alebo epoxidovej živice) spôsobené mechanickým zaťažením. Vyhodnotením interferenčných, tzv. izopachických čiar spolu s izochromatickými čiarami bolo možné získať rozloženie mechanických napätí v danom konštrukčnom prvku. Po objave holograficko-interferenčnej metódy sa jej princíp dal využiť aj na snímanie izopách, a okrem toho, nebolo potrebné používať veľmi presne planparalelné modely, ako v prípade klasickej interferometrie. Prvé hologramy na Slovensku vznikli v roku 1970 v laboratóriu vedenom Dr. Szabóom za asistencie jedného z priekopníkov v tejto oblasti, Prof. J. D. Hovanesianom z Oakland University v Rochestri. Antivibračná ochrana optickej zostavy bola realizovaná ťažkým betónovým stolom (1,5 tony) umiestneným na tlmiacich pružinách zo železničného vagóna a fixáciou prvkov pomocou ťažkých stojanov. Optomechanické držiaky, podobne ako zrkadlá aj s justážou, boli vyrobené svojpomocne v dielni ústavu.

Z hľadiska riešenia vtedajších aktuálnych pružnostných úloh sa ukázalo efektívnym využitie interferen-



Obr. 3 Interferogram dynamicky sa šíriacej deformácie v okolí rýchlo sa šíriacej špičky trhliny.

čných čiar na rovinných transparentných modeloch pri meraní základného parametra v lomovej mechanike – koeficientu intenzity napätí. S úspechom sme tu zdokonalili techniku záznamov hologramov v obrazovej rovine šošovky. Jej možnosti boli podrobne preskúmané z hľadiska spôsobov rekonštrukcie s využitím optickej filtrácie priestorových frekvencií bez použitia difúzneho svetla pri zázname hologramov, čím sa dosiahol maximálny kontrast interferenčných čiar i možnosť zväčšenia detailov obrazu. Na obr. 2 je zobrazená deformácia oblasti v blízkosti špičky trhliny. Rozmery plastickej zóny sú iba niekoľko desiatín mm. Analogická technika holografického záznamu sa realizovala pri výskume trhlín rýchlo sa šíriacich (do 500 m/s) pri zlomení konštrukčného prvku (obr. 3).

Interferometer pracoval s rubínovým laserom UIG-1M zo ZSSR určeným na holografické účely. Zabezpečenie časovej i priestorovej koherencie predpokladá kvalitný Rb-kryštál a vhodný Q-modulátor, ktorým v tomto prípade bola iba pasívna závierka s filtrom KC-19. Technická náročnosť takýchto experimentov je značná, vyžaduje okrem iného synchronizáciu nie veľmi stabilných dejov, napriek tomu sa podarilo nasnímať detailné zábery dynamickej deformácie, ktoré ukázali vplyv dynamickej zotrvačnosti i značnej nelinearity – viskoelasticity materiálu v okolí špičky bežiackej trhliny. S využitím techniky holografickej interferometrie s impulzným laserom boli neskoršie uskutočnené aj štúdie šírenia sa povrchových napätových vln v heterogénnych materiáloch (obr. 4). Mechanické nárazové zaťaženie, ktoré budilo ultrazvukovú



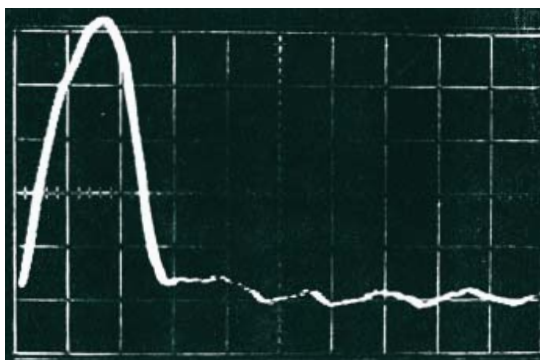
Obr. 4 Vizualizácia napätvej vlny šíriacej sa na povrchu rýchlosťou 3800 m/s.

vlnu, bolo snímané vyvinutým miniatúrnym snímačom sily, ktorý meral časový priebeh pôsobiacej sily na princípe fotoelektrického snímania difrakcie laserového lúča na štrbine. Záznam priebehu nárazovej sily je na obr. 5.

V úsilí o zefektívnenie experimentálneho určovania koeficientu intenzity napätí sme navrhli holografickú modifikáciu zdvihového (shearing) interferometra, kedy sa medzi dvojexpozíciou hologramu aplikuje mechanické posunutie obrazov. Tento spôsob holograficko-interferenčného záznamu s využitím techniky obrazových hologramov má svoje prednosti pri výskume dynamiky trhlín a jeho princíp neskoršie využívali aj v zahraničí [8].

Schopnosť merať pole premiestnení na difúzne odrážajúcom povrchu telies je jednou z najdôležitejších vlastností holografickej interferometrie. Pri klasickej schéme záznamu Fresnelových hologramov sa komplikuje vyhodnotenie interferogramov, keďže pre každý bod objektu je nutné pri vyhodnotení dráhových rozdielov riešiť systém rovníc pre tri ortogonálne zložky vektora premiestnenia. V súlade s celosvetovým trendom sme sa sústredili na využívanie optických schém s možnosťou priamej optickej separácie jednotlivých komponentov premiestnenia tak, že sa zvolia vhodné uhly osvetlenia i pozorovania objektu. Špeciálnym prípadom takýchto schém sú speckle interferometrické metódy. Začiatkom 70. rokov sme v optickom laboratóriu ÚSTARCH SAV nasníмали prvé specklegramy. Klasický spôsob speckle interferometrie s vyhodnotením poľa premiestnení pomocou Youngových čiar má veľa nedostatkov, preto sme realizovali rôzne modifikácie. Jednou z nich bol aj tzv. dvojapertúrny speckle interferometer, ktorého charakteristickou výhodou je realizácia modulácie jednotlivých laserových škvŕn-speckle lineárnou mriežkou, ktorá vytvára nosnú priestorovú frekvenciu, a tým sa podstatne zlepšuje kontrast interferenčných čiar. Rozvojom tejto optickej schémy vznikol optický systém, v ktorom sa súčasne zaznamenávali a pri rekonštrukcii priamo separovali všetky tri zložky vektora premiestnenia. Na základe toho sme navrhli postup vyhodnotenia napätosti, kde sa namerané pole premiestnení na povrchu 3D telesa využíva ako vstupný údaj pre výpočet priestorovej napätosti pomocou numerickej metódy okrajových prvkov (BEM) [9]. Takýto postup má rad výhod, lebo berie do úvahy reálne okrajové podmienky (trenie, komplikované rozloženie zaťaženia), pričom aj samotný numerickej výpočet sa podstatne zjednodušuje, keďže sa rieši iba druhá časť úlohy – výpočet napätí. Metóda dostala názov hybridná a jej princíp sa využil vo viacerých prácach publikovaných v zahraničí.

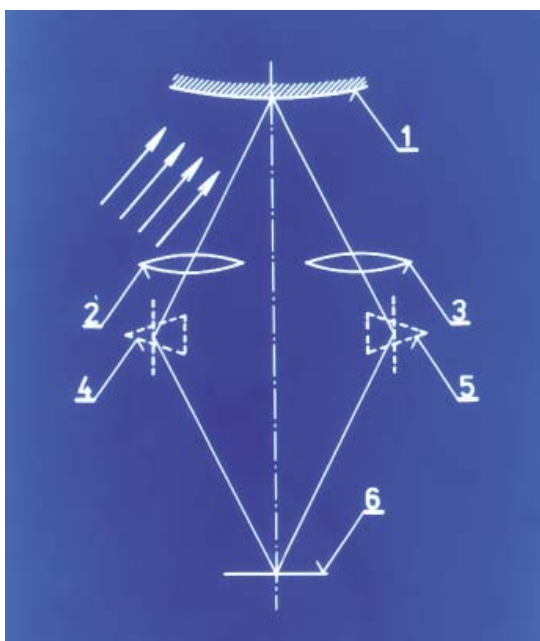
Napriek tomu, že speckle interferenčné merania dovoľujú meranie deformácie povrchu s citlivosťou porovnateľnou s vlnovou dĺžkou svetla, problém zvýšenia tejto citlivosti najmä pri zázname zložky premiestnenia kolmej na smer pozorovania je jedným z kľúčových. Najmä z týchto dôvodov bola rozpracovaná pôvodná schéma speckle interferometra (tzv. dvojkanálová), ktorá si zachováva výhodné exploatačné vlastnosti speckle interferometrie pri viacnásobne vyššej citlivosti a presnosti merania povrchových premiestnení (obr. 6). Navyše, táto optická schéma mala schopnosť podstatného obmedzenia vplyvu dekorelačie dvojexpozíčných záznamov a nekontrolovateľného



Obr. 5 Osciloskopický záznam časového priebehu nárazovej sily pri dopade projektilu na pevný povrch získaný laserovým dynamometrom. Je vidieť približne polosínusový tvar nárazu, tak ako to vyplýva z Hertzovej teórie nárazu. Delenie časovej základne je 5 μ s/d, kalibrácia stupnice sily je 293 N/d.

premiestnenia objektu ako celku pri zázname. Optický princíp interferometra bol výhodný z hľadiska aplikácie vizualizačného systému CCD kamera – počítač, ktorý sa vtedy začínal využívať, aby sa odstránil tzv. mokrý proces spracovania specklegramu. Patentovaný bol aj spôsob snímania interferogramov pomocou modulačnej mriežky využívajúci nosnú frekvenciu záznamov [10].

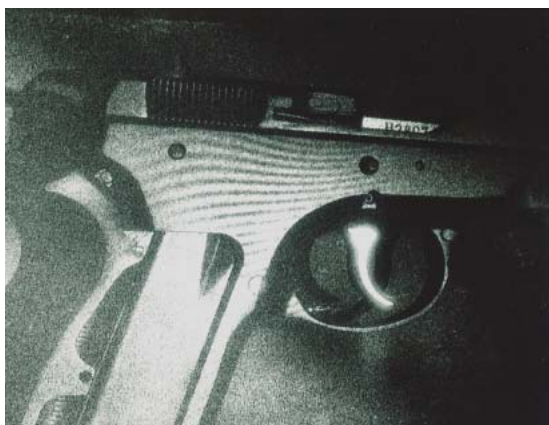
Niektoré z rozpracovaných optických metód neslúžili iba pri výskume v mechanike, ale boli využité pre viaceré aplikácie, kde sa riešili aktuálne problémy inžinierskej praxe. Uvádzaný dvojkanálový interferometer sme napr. využili pri meraní termomechanickej deformácie a napätosti v reálnom materiáli steny jadrového reaktora VVER 440 pre podnik Škoda Plzeň. Simulovali sa potenciálne defekty vo vrstve návarky z austenitickej ocele, ktorá pokrýva vnútornú stranu jadrového reaktora. Z iných aplikácií, kde sa využívali optické metódy založené na využití laserového svetla, spomeňme napr. interferenčné meranie deformácie kovových zrkadiel vyvíjaného výkonového lasera pre VÚMA Nové Mesto nad Váhom, meranie zvyškovej deformácie, ktorá



Obr. 6 Principiálna schéma dvojapertúrneho speckle interferometra umožňujúca zvýšenie citlivosti merania premiestnení [10].

» Niektoré z rozpracovaných optických metód neslúžili iba pri výskume v mechanike, ale boli využité pre viaceré aplikácie, kde sa riešili aktuálne problémy inžinierskej praxe. «

» Viacero ďalších výskumných ale i inžinierskych aplikácií laserových meracích technológií bolo využitých najmä v oblasti mikroelektroniky a mikromechaniky. «

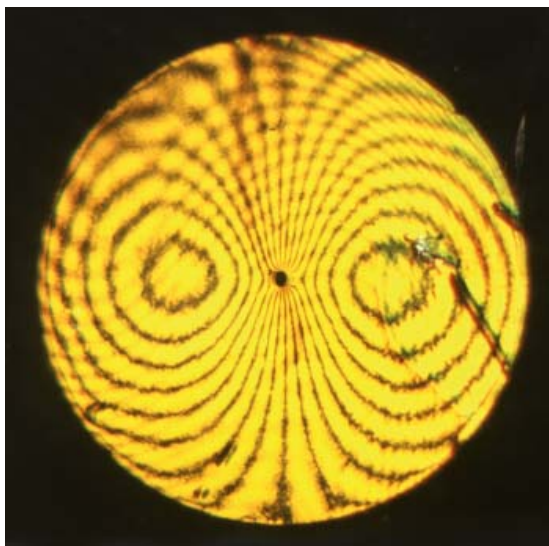


Obr. 7 Deformácia puzdra záveru, ktorá vzniká pri výstrele z pištole.

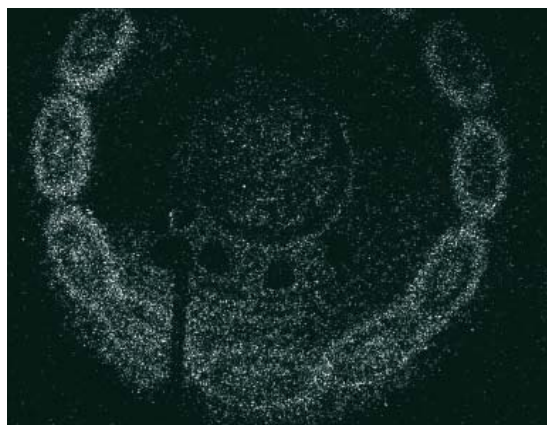
vzniká po výstrele z pištole vzor 85 pre Zbrojovku v Uherskom Brode (obr. 7), alebo vyšetrovanie kmitových módov pneumatík pre Matador Púchov (obr. 8). Laserový lúč sa využil napr. aj pri meraní excentricity veľkých sušiacich valcov so zrkadlovým lešteným povrchom (priemer 1,85 m, dĺžka 9 m) papierenského stroja SCP Ružomberok. Využitím tzv. sendvičového princípu, keď sa každý z dvoch porovnávaných specklegramov sníma na samostatnú fotoplatňu, sme v spolupráci s VŠP Nitra určovali aj deformáciu hlavy motora traktora. Táto málo využívaná technika nám dovolila v „nelaboratórnych“ podmienkach určiť veľmi citlivo pole deformácie využitím fotoelek-



Obr. 9 Interferenčné čiary v okolí trhliny.



Obr. 10 Izočiarly rovnakých sklonov na priečne ohýbanej doske nasnímané zdvihovým interferometrom.



Obr. 8 Jeden z radiálnych kmitových módov pneumatiky Matador MP 15 zaznamenaný elektronickou speckle interferometriou pri frekvencii 220 Hz.

trického mapovania specklegramov. Pracovníci Mechanizačnej fakulty VŠP Nitra realizovali aj ďalšie aplikácie zamerané predovšetkým na riešenie strojárskych problémov poľnohospodárskych mechanizmov, ale tiež napr. aj na vyšetrovanie kvality ovocia (jablák) bezkontaktným meraním vibračnej odozvy plodu pomocou laserovej vibrometrie. Treba spomenúť aj činnosť na Vysokéj škole lesníckej a drevárskej vo Zvolene, kde sa pomocou holografickej interferometrie (time-average metóda) riešili problémy diagnostiky kvality dreva pre výrobu hudobných nástrojov a tiež technologického procesu vysušovania dreva (merala sa medzná vrstva).

Viacero ďalších výskumných ale i inžinierskych aplikácií laserových meracích technológií bolo využitých najmä v oblasti mikroelektroniky a mikromechaniky, kde ako sa ukazuje, bezkontaktnosť a neinvazívnosť meracích princípov založených na využití laserového svetla je kľúčovým faktorom. V rámci Medzinárodného laserového centra v Bratislave sa tieto metódy ďalej rozvíjajú a úspešné využívanie ich možností najmä v spojení s elektronikou názorne potvrdzuje ďalšiu perspektívu ich vývoja.

PodĎakovanie

Publikácia vznikla ako výsledok realizácie „Centra excelentnosti pre návrh, prípravu a diagnostiku nanoštruktúr pre elektroniku a fotoniku (NanoNet 2)“ s podporou Research 7 Development Operational Programme funded by the ERDF.

Literatúra

- [1] A. Einstein: Phys. Z. **18**, 121 (1917).
- [2] V. A. Fabrikant: Doktorská dizertácia, FIAN SSSR, Moskva 1939.
- [3] J. Túma: Věda a technika mládeži (**25**), 867, (1963).
- [4] A. Sochor: *Lasery a koherentní svazky*, Academia, Praha 1990.
- [5] Kolektív autorov: *Laser a jeho použití*, Sb. referátů, Praha 1969.
- [6] R. L. Powell, K. A. Stetson: J. Opt. Soc. Am. **55**, 1593 (1965).
- [7] E. B. Aleksandrov, A. M. Bonč-Brujevič: Soviet Phys.-Tech. Phys. **12**, 258 (1967).
- [8] H. Tippur, A. Rosakis: Int. J. Fract. **27**, 746 (1991).
- [9] J. Balaš, J. Sládek, M. Držík: Exp. Mech. **23**, 196 (1983).
- [10] M. Držík: *Holografický interferometer pre meranie premiestnení kolmých na smer pozorovania*, AO 272 641, Praha 1990.