Laserový systém pro termojadernou syntézu

J. Kusý, I. Podlahová, T. Sedláček
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Břehová 7, 115 19 Praha 1
kusyjakub@email.cz

abstrakt:
Historie vzniku laseru, klasifikace laseru, princip laseru pro termojadernou fůzi a některé příklady dnes používaných laserů.

1 Historie laseru

Laser patří mezi mladší vynálezy 20. století. Přesto, že mu je letos teprve 46 let, stal se nedílnou součástí našeho života. Slovo samo je zkratkou anglického výrazu "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*", což se překládá jako "zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření. Český výraz pro laser je "kvantový generátor světla". Z názvu je zřejmé a ze zkušenosti víme, že laser je zařízení, které vydává elektromagnetické záření. Od běžného světla (např. světla žárovky) se však liší tím, že je monochromatické (jednobarevné), koherentní (uspořádané), má malou divergenci (rozbíhavost) a má velkou časovou, prostorovou a spektrální hustotu. Koherentní světlo má jedinou frekvenci a fázi a lze je přirovnat k pochodujícímu vojenskému útvaru, zatímco nekoherentní světlo k davu lidí pohybujících se chaoticky po ulici.

Činnost laseru je založena na principu stimulované emise, který Albert Einstein předpověděl již v roce 1916. Talentovaný anglický fyzik Paul Adrien Maurice Dirac provedl koncem 20. let ještě detailnější matematickou analýzu kvantové teorie záření a dále rozvinul Einsteinovy myšlenky. Avšak teprve v roce 1958 provedl Charles Hard Towens (pozdější nositel Nobelovy ceny za fyziku) se svými spolupracovníky správné výpočty, které umožnily tuto myšlenku realizovat. Koncem roku 1959 se začala pozornost vědců obracet k rubínu, jednomu z nejušlechtilejších drahých kamenů. Vědce však zajímalo to, že rubín jeví fotoluminiscenci. V létě roku 1960 americký fyzik Theodore Harold Maiman vyleštil koncové stěny krystalu umělého rubínu a opatřil je vrstvičkou stříbra (ve funkci zrcadla). Po ozáření krystalu zeleným světlem (optické buzení) pronikl výstupním zrcadlem červený paprsek laserového světla. Maiman se tak stal tvůrcem prvního laseru.

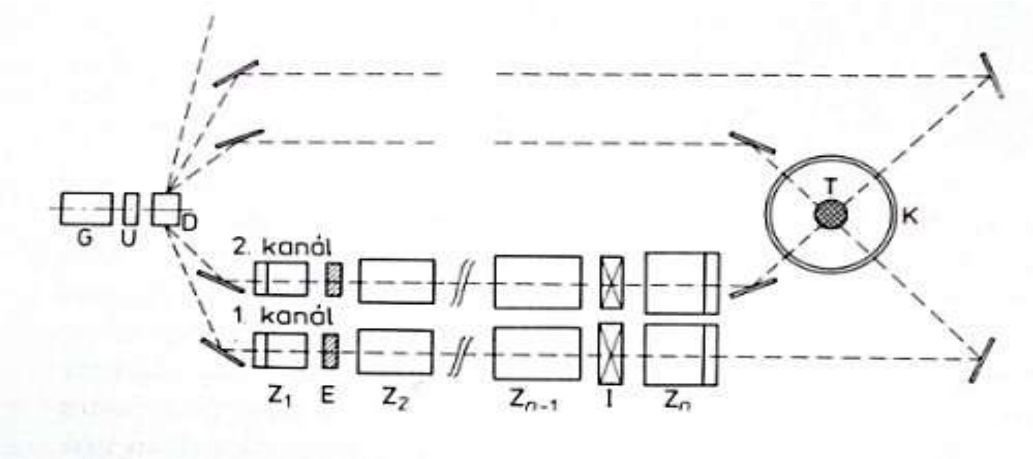
Od té doby procházel laser neustálým vývojem. Jednotlivé typy se také postupem času zdokonalovaly a vylepšovaly se jejich parametry.

2 Klasifikace laseru

Dnes můžeme lasery rozdělit do různých kategorií. Podle materiálu aktivního prostředí, z kterých může být získán laserový efekt, jsou to především lasery pevnolátkové, kapalinové a plynové. Čerpat energii mohou lasery zejména opticky, elektricky, chemicky nebo termodynamicky. Lasery můžeme dělit také podle vyzařované vlnové délky na infračervené, v oblasti viditelného světla, ultrafialové a rentgenové, nebo podle délky výstupního impulsu na kontinuální, pulsní a impulsní. Konečně můžeme lasery dělit podle použití na lasery výzkumné, měřicí, lékařské, technologické, energetické a vojenské.

3 Princip laseru pro termojadernou fůzi

Laserový systém pro termojadernou syntézu je zařízení, které se skládá z generátoru, laserových zesilovačů a dalších optických prvků umožňující přivést velkou energii laserového záření do malého objemu prostoru.



Obr. 1 - Schéma vícekanálového zesilovače

Laserový generátor G pracuje buď v režimu synchronizace modů (piko až attosekundové impulsy). Synchronizace modů je ovládání fází a amplitud modů elektromagnetického pole v optickém rezonátoru laseru, který bývá většinou realizován jako otevřený rezonátor, což je soustava odrazných ploch a optických prvků, ve které může být vzbuzeno stojaté vlnění s vlnovou délkou zpravidla podstatně menší než jsou geometrické rozměry prvků a vzdálenost mezi nimi. V mnohomodovém laseru vede synchronizace modů ke generaci sledu impulsů, což je řada impulsů, které „jdou“ za sebou v pravidelných časových odstupech. Jejich amplitudy a pološířky bývají přibližně stejné. Synchronizace modů lze dosáhnout různými metodami, obecně spočívají v periodické změně některého parametru laseru (zisku ztrát, délky rezonátoru). Perioda změn, popř. její celistvý násobek musí být roven době oběhu optického záření rezonátorem. Synchronizace modů se provádí různými synchronizátory v pevnolátkových laserech, barvivových laserech, polovodičových laserech, barvivových laserech a plynových laserech.

Laserový generátor může taktéž pracovat v režimu Q-spínání (nanosekundové impulsy). Q-spínání je metoda řízení činitele jakosti otevřeného rezonátoru během činnosti laseru. Princip metody spočívá v tom, že se mění ztráty rezonátoru. V okamžiku zapnutí budícího impulsu je jedno ze zrcadel rezonátoru vyřazeno z činnosti laserovou závěrkou (Q-spínačem). Ztráty rezonátoru jsou velké, činitel jakosti rezonátoru je malý a generace záření nemůže vzniknout. Díky buzení laseru dochází k narůstání inverze populace hladin v aktivním prostředí, vzbuzené elektrony se hromadí na horní laserové hladině a vyzařují pouze spontánně. Rychlým otevřením Q-spínače nejlépe v okamžiku dosažení maximální inverze v aktivním prostředí se v rezonátoru sníží ztráty, činitel jakosti vzroste, dojde k rychlému rozvoji generace záření. Protože všechny vzbuzené atomy přecházejí téměř najednou do základního stavu, je generován krátký impuls o velkém výkonu. Délka tohoto impulsu a energie závisí právě na rychlosti Q-spínání, také na vlastnostech aktivního prostřední a budícího systému.

Elektrooptická uzávěrka U propouští záření jen po velmi krátkou dobu. Děličem svazku D se vytvoří několik rovnocenných optických svazků, které jsou zaváděny do zesilovacích systémů. Každý kanál je tvořen soustavou laserových zesilovačů Z_1, Z_2, …, Z_n, jejichž příčné rozměry postupně narůstají tak, aby intenzita laserového záření nepřesáhla v žádném místě práh rozrušení optického materiálu. Mezi zesilovači bývají vloženy expandéry svazku E, což jsou optické soustavy zvětšující příčný rozměr svazku a zmenšující jeho divergenci (rozbíhavost) a optické izolátory I, což jsou zase zařízení sloužící k oddělení optických kvantových zesilovačů. Toto zařízení také zabraňuje zesilování spontánní emise v období před příchodem impulsu. Optické izolátory se používají rovněž k oddělení posledních stupňů optických kvantových zesilovačů od terče, čímž se zabraňuje jejich případné destrukci zesílenou částí záření odraženého zpět. Ideální optický izolátor působí jako závěrka, která se otevírá pouze na dobu nutnou k průchodu laserového impulsu.

Svazek elektromagnetických zařízení vystupující z každého kanálu je fokusován čočkou nebo zrcadlem na terč T umístěný v interakční komoře K. Prostorové uspořádání systému je takové, aby byla zajištěna prostorová symetrie ozáření terče a současně aby impulsy optického záření dopadaly na terč ve stejný okamžik (stejné optické dráhy jednotlivých kanálů).

4 Příklady dnes používaných laserů

Různé experimentální varianty laserových systémů pro termojadernou syntézu byly realizovány v laboratořích bývalého SSSR, USA, Japonska a dalších zemí . Například ve fyzikálním Ústavu P. N. Lebeděva v Moskvě bylo zkonstruováno zařízení DELFÍN s celkovou energií optických zařízení (po sečtení 216 paralelních kanálů) 10 kJ s dobou trvání impulsu 1 ns. V USA již v roce 1978 pracoval osmisvazkový laserový systém pro termojadernou syntézu HELIOS s CO_2 lasery s úhrnnou energií 10 kJ. Tento systém byl složen ze čtyř dvousvazkových kanálů. Poslední výkonové zesilovače byly umístěny ve stejné místnosti jako interakční komora. O šest let později byl v téže laboratoři postaven ještě výkonnější systém se šesti kanály nazvaný ANTARES. V jiné americké laboratoři (Lawrence Livermore Laboratory) byly prováděny experimenty s 12kanálovým laserovým systémem pro termojadernou syntézu SHIVA s neodymovými skly. Řetězce zesilovačů obsahují každý 11 zesilovacích stupňů rozložených na dráze o délce 55 m. Energie optického záření na výstupu každého z kanálů byla 1 kJ, délka trvání impulsu 0,1 až 0,5 ns. Cena takového zařízení se odhaduje na 20 miliónů US dolarů. Jiným příkladem je zařízení GEKKO, které je 12kanálové, má výstupní energii až 30 kJ a dobu trvání impulsu 0,1 až 1 ns.

V současné době disponuje i Česká Republika jednostupňovým laserovým systémem pro výzkum termojaderné fůze, PALS (Prague Asterix Laser System) zakoupený z Ústavu Maxe Plancka pro kvantovou optiku za symbolickou jednu korunu. Tento jodový laser má výstupní energii 0,1 kJ a délku pulsu 1 ns.

Reference:

[1] M. Vrbová a kol., Lasery a moderní optika, Prometheus, Praha, 1994
[2] Laser, http://www.quido.cz/objevy/laser.htm