

Počátky kvantové elektroniky v Ústavu radiotechniky a elektroniky¹

Jan Blabla¹, Viktor Trkal²

¹Slezská 97, 130 00 Praha 3; ²Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha-Kobylisy

Vzpomínky dvou emeritních vědeckých pracovníků ÚRE ČSAV inspirované padesáti lety od realizace prvního laseru.

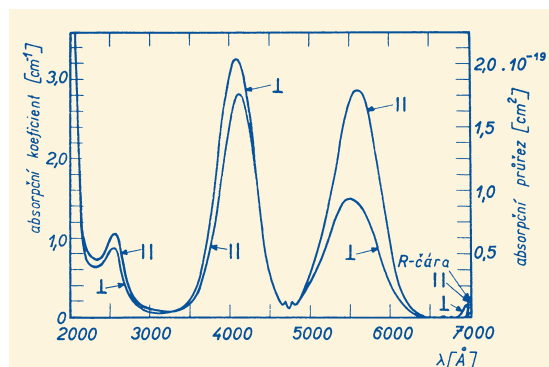
Letos je to 50 let, kdy T. H. Maimann z Hughes Research Laboratories realizoval na bázi krystalu rubínu ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$) první optický kvantový generátor LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) [1] a následně jeho funkci analyzoval [2]. Tento objev následoval po důkladné teoretické práci popisující základní podmínky pro realizaci stimulované emise v optické oblasti spektra, kterou publikovali Schawlow a Townes v r. 1958 [3].

U Maimanova laseru je aktivním prostředím rubín, v němž dochází k zesilovacímu efektu. Aktivní ionty chromu v krystalové mříži Al_2O_3 se prostřednictvím nekoherentního světla xenonové výbojky vybudí ze základního energetického stavu $^4\text{A}_2$ na rozštěpenou metastabilní hladinu E o životnosti 3 ms. K tomuto procesu se využívá dvou širokých absorpčních pásů, které krystal tohoto typu má: absorbují světlo výbojky na vlnových délkách v žlutozelené (500–600 nm) a ultrafialové (350–450 nm) oblasti spektra (obr. 1). Na přechodu označeném R1 dochází za vhodných podmínek k impulzní generaci koherentního záření o vlnové délce 694,3 nm. Mechanismus tohoto typu laseru je tříhladinový, a proto je třeba přečerpat více než 50 % iontů ze základního stavu na metastabilní výchozí hladinu.



Obr. 2 Rubínový krystal s odraznými zrcadly na čelních plochách.

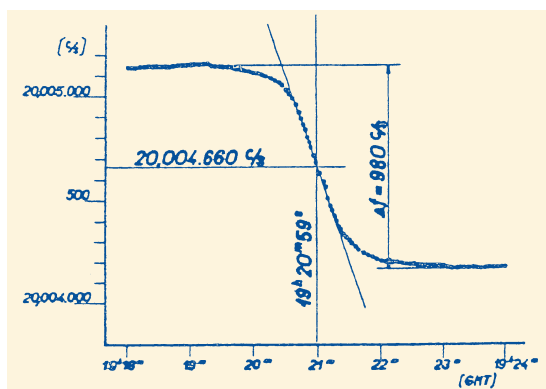
To vyžaduje značnou intenzitu čerpacího záření výbojky. Maimannův rubínový laser tvořil rubínový váleček (optimální koncentrace iontů chromu asi 0,05 % váhového množství Cr_2O_3 v Al_2O_3) s paralelně zaleštěnými rovinnými čelními plochami (vyžaduje se planparalelita čelních ploch v řádu několika úhlových vteřin) s vakuově postříbřenými zrcadly na těchto plochách (obr. 2). Rubín byl umístěn ve středu spirálové impulzní xenonové výbojky o energii až 2,5 kJ. Celé toto uspořádání bylo ve válci s vysoce odraznou vnitřní plochou, která zlepšovala dodatečným odrazem čerpacího světla výbojky účinnost systému. Rubínový laser bylo možné i za relativně malé účinnosti (menší než 0,2 %) provozovat při běžné pokojové teplotě. Přes všechny fyzikální obtížnosti (tříhladinový laserový systém, neúčinný čerpací proces) byl rubín-



Obr. 1 Absorpční spektrum rubínu pro případ světla dopadajícího souběžně nebo kolmo na osu c. R-čára odpovídá poloze laserové komponenty [2].

¹ V r. 2007 byl Ústav radiotechniky a elektroniky ČSAV přejmenován na Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR.

» Lasery patří do vědního oboru, kterému se dnes říká kvantová elektronika. «



Obr. 3 Dopplerův efekt na Sputniku I změřený v ÚŘE ČSAV.

nový laser prvním experimentálním zařízením a byl v tomto uspořádání převzat k prvním pokusům v řadě světových laboratoří.

Než však k realizaci rubínového laseru došlo, muselo proběhnout mnoho let intenzivního bádání v celé řadě oborů. Pokusme si tento vývoj poznání alespoň trochu nastínit.

Lasery patří do vědního oboru, kterému se dnes říká kvantová elektronika. Teoreticky předpověděl stimulovanou emisi Albert Einstein v r. 1917 [4], experimentálně pak poprvé C. E. Cleeton a N. H. Williams, kteří změřili na molekule amoniaku první mikrovlnné spektrum v roce 1933 [5]. Vyšli z publikovaných infračervených spekter amoniaku, kde D. M. Dennison a J. D. Hardy [6] konstatovali jasné zdvojení čar molekuly NH_3 . To se dalo vysvětlit jen tím, že existují dvě energeticky odlišné, chemicky totožné molekuly NH_3 , jejichž energetický rozdíl leží v mikrovlnném pásmu.

Rozvoj mikrovlnné techniky za druhé světové války umožnil zpřesnění původních měření, a tak celá řada autorů v letech 1946 publikovala své výsledky, mezi nimi v USA i C. H. Townes [7]. Ten také v roce 1954 [8] a nezávisle na něm v téže době v Sovětském svazu N. G. Basov a A. M. Prochorov [9] sdělili světu, že se jim podařilo realizovat na molekule NH_3 stimulovanou emisi na čáře $J = 3, K = 3$ v mikrovlnném pásmu 1,25 cm. Townes toto zařízení nazval MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) a toto lze považovat za okamžik skutečného zrození kvantové elektroniky. Za tento objev generace stimulované emise se všichni tři stali po zásluze v roce 1964 nositeli Nobelovy ceny za fyziku.

Na tomto místě je třeba připomenout objev elektronové paramagnetické rezonance (EPR), někdy nazývané spinové (ESR), který učinil E. K. Zavojskij již v roce 1944 [10].

CESTA KE KVANTOVÉ ELEKTRONICE NA ÚŘE

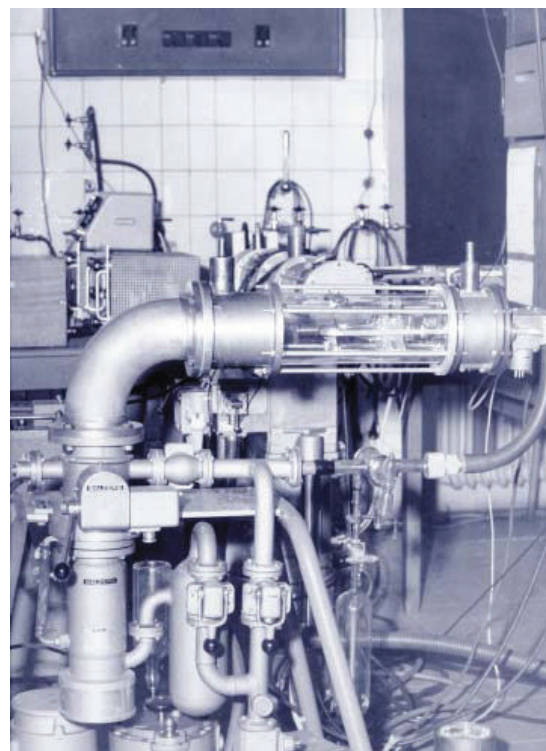
Po ukončení druhé světové války bylo hlavním úkolem v oblasti vzdělávání obnovit výuku na českých vysokých školách a zajistit nezbytný vývoj pro naše elektrotechnické výrobní podniky. To vše se podařilo poměrně úspěšně a rychle. Po roce 1948 došlo v oboru elektroniky k soustředění výroby především v národním podniku Tesla. Z ředitelství a výzkumné základny dřívější firmy Philips na Karlově náměstí č. 7 se stal Výzkumný ústav pro elektrotechnickou fyziku (VÚPEF), kde se v průběhu začátku padesátých let vytvářely podmínky pro vznik Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV (ÚŘE ČSAV). Ten vznikl v roce 1955. Optika

byla soustředěna do Ústavu technické optiky v Praze a Výzkumného ústavu optiky a jemné mechaniky v Přerově a některé příbuzné obory našly své zázemí ještě na dalších pracovištích.

ÚŘE ČSAV měl za jeden z hlavních úkolů generaci přesného kmitočtu a času. Oddělení vedl Jiří Tolman², kterému se podařilo s tehdejšími, na tu dobu špičkovým časoměrným zařízením využívajícím křemenné piezoelektrické oscilátory zachytit a změřit první umělou družici Země *Sputnik 1*. Stalo se tak 18. října 1957, kdy J. Tolman a jeho spolupracovníci v laboratořích upravených ze stáji historického Colloredo-Mansfeldského paláce v Karlově ulici u Karlova mostu změřili tzv. Dopplerův jev na Sputniku (obr. 3). To a následná publikace jejich měřicí metodiky [11] vyvolalo mimořádný světový ohlas i rozruch. Později se ukázalo, že tato skutečnost výrazně ovlivnila i osud ústavu a rozvoj nově vznikající kvantové elektroniky. Jeden z nás (VT) popisuje tehdejší vývoj následovně:

„Po obhájení kandidátské disertace z EPR organických volných radikálů [12, 13] mne v létě 1958 tehdejší ředitel ústavu Sergej Djadkov požádal, zda bych se nepokusil realizovat v podmínkách ÚŘE NH_3 maser. V té době byl ústav dislokován na různých místech v Praze. Já jsem měl pracoviště v nové budově Geofyzikálního ústavu ČSAV na Spořilově. Ředitel Djadkov přislíbil pomoc z IRE AV SSSR. Po zvážení všech pro a proti jsem úkol přijal, zejména když J. Tolman o kvantový generátor tak velice stál. A tak jsem začal shromažďovat a studovat všechny dostupné a k tomu potřebné publikace. Současně začala výstavba budovy ústavu v Kobylisích, kde se jednalo z úsporných důvodů o modifikovaný projekt spořilovského Geofyzikálního ústavu. Ten bylo třeba upravit na podmínky potřebné pro zamýšlený program. Budova byla dokončena koncem roku 1960 a naše laboratoře se začaly vybavovat na jaře 1961 a ihned začaly přípravné experimentální práce na NH_3 maseru.

2 Zde i v dalším textu neuvádíme u jmen akademické tituly.



Obr. 4 NH_3 maser (ÚŘE-ČSAV – březen 1963).

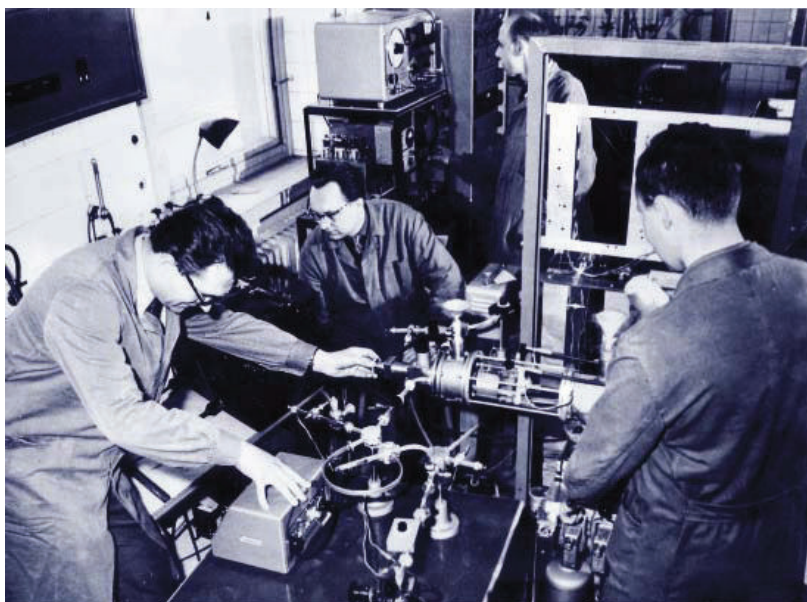
Pod mým vedením vznikla tzv. Laboratoř kvantové elektroniky, jejímiž členy na počátku byli Jan Blabla, Přemysl Hřebačka, Alena Jelínková (později Gregorová), Ludmila Lukešová (později Matějková), Milan Roubal a Jaromír Vendl. Po intenzivní práci (často i více než 12 hodin denně) a mnoha peripetiích se nám 25. března 1963 asi v 18 hodin večer podařilo uvést do chodu náš NH_3 maser na čáře $J = 3, K = 3$ v pásmu 24 GHz (obr. 4). Znamenalo to pro nás velkou úlevu a radost. Další masery pak následovaly v odstupu několika měsíců. Z laboratoře se stalo oddělení a přibýli postupně i další pracovníci (obr. 5): Oldřich Dousek a Václav Soukup z oddělení J. Tolmana a vědeckí aspiranti Vlastimil Bajgar a Pavel Engst a noví dva aspiranti na EPR Zdeněk Šroubek a Karel Žďánský a dále František Kubec. Průběžně byl současně sledován i vývoj kvantové elektroniky ve světě.

Okamžikem spuštění NH_3 maseru se J. Blabla a A. Jelínková začali intenzivně věnovat rubínovému laseru, který byl na našem pracovišti uveden do provozu v květnu téhož roku a následně předveden v pražském Planetáriu široké občanské veřejnosti.

Do konce roku 1963 pak byly postaveny další dva NH_3 masery na společném vakuovém stojanu. Naše konstrukce se skleněnými válci umožňovala průhled do vlastního systému maseru a také, jak se ukázalo, ovlivňování jeho kmitočtu vnějšími elektrickými poli. To vedlo k objevení a změření Starkova jevu na inverzním přechodu molekuly NH_3 . Toto překvapující sdělení na Mezinárodním kongresu pro chronometrii v červnu 1964 v Lausanne vyvolalo značný ohlas [14]. Do konce roku se pak podařilo realizovat izotopický $^{15}\text{NH}_3$ maser s recirkulací, což byl veliký úspěch. Byli jsme pátí na světě. Přípravovali jsme výzkum dalších molekul dusíkatých sloučenin, neboť porovnání inverzních kmitočtů NH_3 až ND_3 a molekuly metylaminu NH_2CH_3 [15] vykazuje posuv od 24 GHz do 10 kHz a připouští i možnost inverzních stavů u jiných alifatických aminů, případně aminokyselin. To by ve svých důsledcích vedlo k možnému kódování informací na těchto molekulách a případně i přispělo k objasnění otázek dotýkajících se podstaty živé hmoty [16].

V lednu 1963 nastoupil do ÚRE-ČSAV nový ředitel V. Zima, který přes úspěšnost našeho výzkumu nečekaně v prosinci 1964 rozhodl, že na rok 1965 pozastavuje veškeré práce na maseru. Současně přeložil pracovníky Douska, Hřebačku a Roubala na zcela jiný program ústavu, takže jsem zbyl s V. Bajgarem, který dokončoval aspiranturu na maseru, sám. Snad to souviselo s tím, že maseru se také všeobecně říkalo „atomové hodiny“ a že ředitel byl vystaven vnějším tlakům, aby v Československu nebyla základem tzv. „atomového času“ umožňující sledování trasy rychle se pohybujících objektů, což ve svém důsledku by později mohlo vést k GPS. Jiný důvod však mohl být i politický. Jak se později ukázalo, měl přinejmenším stejnou váhu. Nesmíme ani zapomínat, že to vše se odehrávalo v období tzv. kubánské krize. V roce 1966 nás posílil V. Vávra a pokračovali jsme na pozastaveném programu. Zjistili jsme, že za určitých podmínek vzniká v maseru na molekule NH_3 také měkké rentgenové záření. To znamenalo určité bezpečnostní úpravy a novou celokovovou konstrukci. Publikace tohoto jevu nám byla zakázána.

Po úspěšné realizaci NH_3 maseru a našeho rubínového laseru přišel prof. B. Kvasil s návrhem, abychom uspořádali spolu s FJFI ČVUT postgraduální kurz kvantové elektroniky, jehož organizací jsem byl pověřen. Kurz



Obr. 5 Pracovní skupina z maserového a laserového programu (zleva: V. Trkal, P. Hřebačka, O. Dousek, J. Vendl).

se konal vždy v sobotu v budově ústavu v Kobyliších a začal 30. 11. 1963 v týdenních nebo čtrnáctidenních odstupech. Zpravidla byly na pořadu dvě dvouhodinové přednášky. V závěru pak byly předvedeny naše laboratoře. Kurzu se zúčastnilo na 100 posluchačů. Přednášeli mimoústavní pracovníci B. Kvasil, J. Formánek, V. Petržílka, J. Kašpar, T. Šimeček, I. Štoll, M. Trlifaj, V. Tysl, K. Ulbert a kolegové J. Blabla, V. Kment, Z. Šroubek, V. Trkal a K. Žďánský. Texty obětavě opisovala paní R. Macurová a obrázky a další redakční činnost zajišťovaly A. Jelínková a L. Matějková. Celkem se odpřednášelo 114 hodin v průběhu 19 kurzovních dnů. Na závěr dostala 23. 5. 1964 podle prezence naprostá většina účastníků osvědčení o absolvování kurzu. Ke každé přednášce byla vydávána skripta. Tento kurz lze považovat za první výukový program oboru kvantové elektroniky v tehdejší ČSSR. Dodatečně byl doplněn sérií knižních publikací [17–19] a řadou přehledových článků publikovaných v nejrůznějších tuzemských časopisech (např. [20]).”

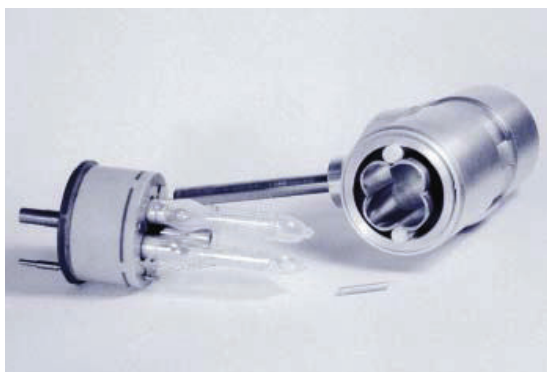
LASEROVÉ PROGRAMY

Do roku 1972, kdy dochází k úplnému vyřazení výzkumu laserů z programu ÚRE-ČSAV, jsme průběžně realizovali celkem čtyři slibně se rozvíjející laserové programy:

1. Výzkum laserů na bázi iontových krystalů a jejich aplikace (od r. 1962 průběžně)
2. Výzkum a experimentální ověřování molekulárních laserů (od r. 1966 průběžně do r. 1972)
3. Výzkum He-Cd laseru o vlnové délce 441,6 nm (1970–1972)
4. Výzkum laserů na bázi organických barviv s laditelnou vlnovou délkou (1971–1972)

Pevnofázové lasery

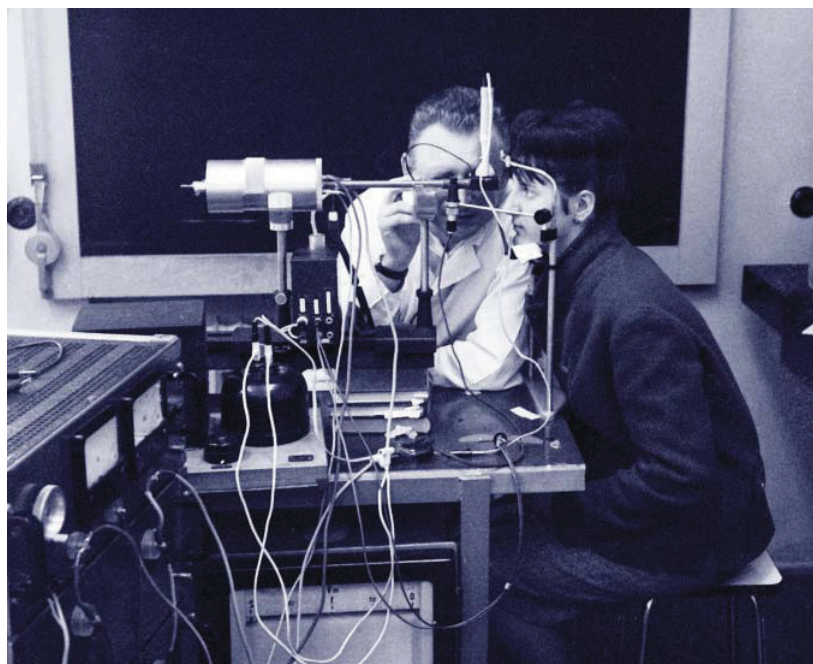
Po úspěšné realizaci rubínového laseru probíhaly práce na ověřování jeho základních parametrů. Laser byl zhotoven v klasickém Maimanově uspořádání, místo spirálové výbojky se použily dvě výbojky tvaru U (obr. 6). Aktivním prostředím byl rubínový krystal o průměru 5 mm se zabroušenými planoparalelními čelními plochami, na které se ve vakuu nanesly dielektrické



Obr. 6 Rubínový laser ÚRE-ČSAV v rozloženém stavu: mezi výbojkami se uchycuje rubínový krystal (v popředí), čtyřeliptická dutina se použila k dosažení vyšší účinnosti čerpacího záření (květen 1963).

vrstvy. Tím se vytvořil zesilující systém s rezonátorem. Xenonové výbojky byly napájeny z baterie kondenzátorů o pracovním napětí asi 4 kV a spouštěny trigrovacím mechanismem. Fyzikální proces stimulované emise byl detekován se zpožděním asi 0,5 ms po záblesku výbojky. Oscilografický záznam takového impulsu vykazuje zcela nepravidelné relaxace signálu, které odpovídají rychlým změnám zisku v aktivním prostředí. Naměřená šířka spektrální čáry spontánní emise před laserovým procesem (asi 0,3 nm) se při generaci zúžila asi 30krát.

Od samého začátku výzkumných prací na laseru jsme sledovali jeho praktickou aplikaci. Navázali jsme spolupráci s MUDr. J. Johnem z *Institutu pro další vzdělávání lékařů a farmaceutů* na Bulovce a sledovali účinky tohoto záření nejprve na očním pozadí králíků, posléze i na sítnici člověka. K očnímu zákroku u lidí se již tehdy používal nekoherentní zdroj optického záření z xenonových výbojek (např. Lichtkoagulator 5000 Zeiss). Naši snahou bylo ověřit efekt koagulace bílkovin ve tkáni po dopadu laserového záření a vzájemně porovnat výsledky obou postupů. Sledoval se charakter vzniklých lézí a připravoval se postup a technické uspořádání rubínového laseru pro zákrok na sítnici člověka



Obr. 7 Dokumentární snímek z prvního operačního zákroku na sítnici v laserové laboratoři ÚRE-ČSAV provedený MUDr. J. Johnem (1964).

[21–23]. Pozorovaly se rovněž škodlivé účinky záření tohoto typu laseru na živou tkáň [24] a později i na další biologická prostředí [25, 26].

U nemocných pacientů odchlípená sítnice postupně odumírá a pacient přestává následně vidět. V místě dopadu laserového paprsku zfokusovaného oční optikou se sítnice přitlačí k fundu, vznikne zánětlivý proces, kterým se znovu přichytí a její funkce se obnoví. Koagulační účinek se řídí určitými zákonitostmi, z nichž vyplývají požadavky jak na vlastnosti laserového zdroje (intenzita, délka impulsu, divergence svazku), tak také na operační postup. Proces přeměny světelné energie na teplo a jeho rozvod do okolní tkáně (v případě krátkých expozičních) nebo do krevní cirkulace (v případě delších expozičních) lze popsat parciální diferenciální rovnicí, jejíž numerické řešení charakterizuje vlastnosti koagulovaného místa. Tuto skutečnost jsme experimentálně sledovali pomocí He-Ne laseru, jehož vlnová délka je velmi blízká vlnové délce rubínového laseru, a došli jsme k několika zajímavým závěrům [27].

První příležitost k operačnímu zákroku se naskytla u mladé pacientky, které lékařské vyšetření nedávalo jinou šanci na záchranu funkce sítnice než použit uvedený postup. Operační zákrok se odehrál asi v polovině roku 1964 přímo v naší laboratoři. K tomuto účelu byl použit náš rubínový laser provizorně zkombinovaný s oftalmoskopem (obr. 7). Výsledek byl úspěšný, a proto jsme věnovali další pozornost miniaturizaci laserového systému v tom smyslu, aby se laser vešel do oftalmoskopu, který lékař používá k vyšetřování očního pozadí pacienta. Použil se systém s „tužkovou“ výbojkou v uspořádání, které je schematicky znázorněno na obr. 8. K dosažení pozitivních koagulací tak bylo možné použít čerpací energii laseru v rozmezí mezi 150 až 300 J. Laserový impuls měl energii 30 až 200 mJ při délce 300 až 500 μ s. Teplotní režim laseru byl stabilizován vnuceným průtokem vzduchu (30 l/min). To postačilo k opakování generace laserového impulsu po 15 až 20 vteřinách. Tyto práce probíhaly v letech 1964–67, kdy vzniká kompletní zařízení pro klinické operační zákroky nazvané *kvantový koagulátor* (obr. 9) [28, 29, 30]. Miniaturní systém s impulzním napájecím zdrojem byl vyroben ve čtyřech exemplářích a dodán do Institutu pro další vzdělávání lékařů a farmaceutů v Praze na Bulovce, na oční kliniku Všeobecné fakultní nemocnice v Praze na Karlově náměstí a do nemocnic v Mostu a Bratislavě. Na pražském pracovišti očního oddělení na Bulovce bylo tímto zařízením operováno v průběhu následujících let okolo 2 000 pacientů. Při porovnání účinků laserového zařízení s fotokoagulatorem na bázi xenonové výbojky (Lichtkoagulator 5000 Zeiss) se ukázaly výrazné přednosti kvantového koagulátoru [31]. Píše se o tom v odborné zprávě ze spolupracujícího lékařského pracoviště, kde se mimo jiné charakterizuje přístroj jako naprosto spolehlivý a z lékařského hlediska účinný [32, 33].

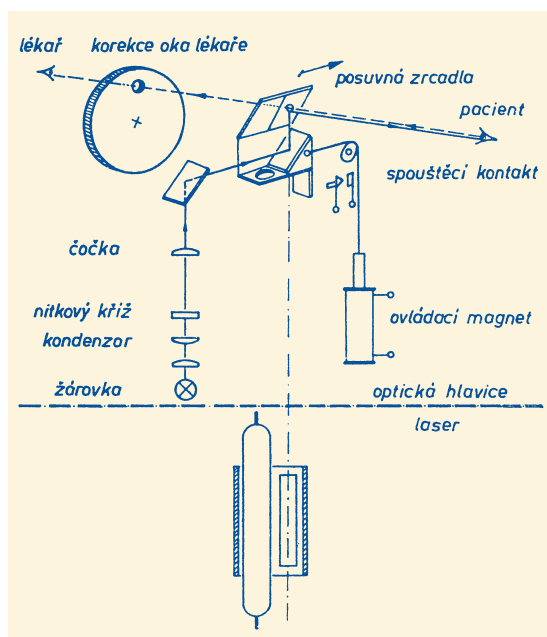
Fotokoagulace sítnice, vysvětlení laserové funkce a praktické používání v očním lékařství bylo předmětem i výukového filmu režiséra V. Kabelíka „Kvantová koagulace oční sítnice“, který jsme odborně řídili. Ten získal na přehlídce technických, vědeckých a naučných filmů v r. 1971 (Techfilm 71) za účasti 17 států se 166 filmy první cenu v kategorii instrukčních, naučných a školních filmů [34].

Jistá pozornost byla v oblasti pevnofázových laserů věnována některým dalším laserovým monokrystalům,

zejména $\text{CaF}_2:\text{Sm}^{2+}$. Program jsme řešili ve spolupráci s Ústavem monokrystalů Turnov, kde se vypěstovaly příslušné vzorky a opticky opracovaly. Samariový laser na rozdíl od rubínového je typem čtyřhladinového laseru, a proto vyžaduje podstatně nižší čerpací energii. U dvojmocných iontů vzácných zemin dochází k intenzivní absorpci ve viditelné a infračervené oblasti spektra. U samaria je intenzivní absorpce v modré a blízké červené spektrální oblasti. Emisní spektra jsou mnohem širší než u trojmocných iontů a u samaria na krátkovlnné straně širokého emisního pásu se objevuje při nízkých teplotách ostrá emisní čára (696,9 nm), která byla tehdy považována za kandidáta pro kontinuální generaci stimulované emise. Naše práce se soustředily převážně na posouzení optické kvality pěstovaných krystalů a na konstrukci systému s chlazením na teplotu kapalného dusíku [35].

Molekulární lasery

Ve druhé polovině šedesátých let vzniká v oddělení kvantové elektroniky program molekulárních laserů. Vytvořila se laboratoř pro práce s molekulárním prostředím (vakuum, plyny N_2 , He, CO_2 pro průtokový režim, vysoké napětí, detekce infračerveného záření, elektronika). Lineární tříatomová molekula CO_2 byla v té době v popředí zájmu světových laserových laboratoří a stala se nejučinnějším aktivním prostředím pro realizaci výkonového kontinuálně pracujícího laseru ve vzdálené infračervené oblasti spektra o vlnové délce 10,6 μm [36]. Princip laseru se směsí CO_2 , N_2 a helia je založen na předání energie z molekuly dusíku v prvním vzbuzeném vibračním stavu ($v = 1-2 \cdot 330,7 \text{ cm}^{-1}$) na molekulu CO_2 v základním stavu. Tímto přenosem se CO_2 dostane do vzbuzeného stavu $00^0 1 \Sigma_u^+$ se značnou účinností (obě vzbuzené hladiny se totiž energeticky liší jen o pouhých 18 cm^{-1}). Poněvadž molekula CO_2 navíc vykonává rotační pohyb, každý vibrační stav je tak rozdělen na sérii podhladin označených rotačním kvantovým číslem J a k přechodům pak dochází mezi rotačními hladinami příslušných vibračních stavů. Tyto přechody se označují jako $P(J)$ a $R(J)$ a platí pro ně výběrová pravidla



Obr. 8 Schematické uspořádání optické hlavice kvantového koagulátoru – kombinace upraveného oftalmoskopu s miniaturním rubínovým laserem.



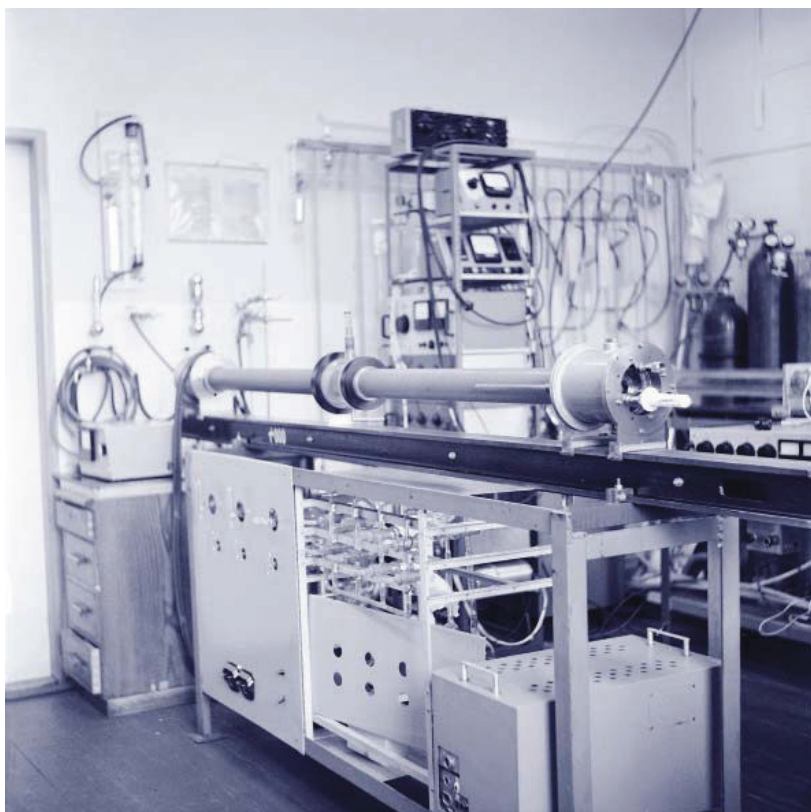
Obr. 9 Kvantový koagulátor: sonda s miniaturním laserem a upraveným oftalmoskopem váží 65 dkg.

$\Delta J = \pm 1$ ³. Mechanismus funkce molekulárního laseru je poněkud jiný, než je tomu u atomárních nebo iontových plynových laserů, takže může docházet ke generaci i za podmínky, kdy mezi vibračními stavy neexistuje inverzní populace. K dosažení generace postačí jen partiální inverze v rotačně-vibračním spektru. Funkce CO_2 laseru byla tak zaznamenána na desítkách rotačně-vibračních přechodů v systému vibračních stavů $00^0 1-10^0 0$ a $00^0 1-02^0 0$. Helium přispívá ve směsi CO_2-N_2 ke zvýšení výkonu několikerým způsobem: ovlivňuje stabilitu molekul CO_2 a zabráňuje tak destrukci CO_2 ve výboji na molekulu CO , popřípadě na další produkty, přispívá ke zvýšení zisku přibližně na dvojnásobek, ovlivňuje populaci jednotlivých rotačních hladin, a tak transformuje výkon z jednotlivých rotačních přechodů do jediné $P(18)$ nebo ještě do několika málo blízkých výkonově již zanedbatelných přechodů. Přestože spodní hladina laserového přechodu není základním stavem molekuly, depopuluje se velmi rychle zářivou rekombinací. Na rozdíl od atomárních nebo iontových plynových laserů se molekulární lasery vyznačují velkou účinností (okolo 20 %, v některých technických uspořádáních i větší). Poněvadž zisk a výkon CO_2 laseru roste s délkou trubice, jsou extrémní kilowatové lasery značně dlouhé, lasery o výkonu nad 100 W mají délku 1,5 až 2 m. Některá technická uspořádání založená na rychlé detemalizaci molekuly CO_2 dosahují však kilowatových výkonů na délce rezonátoru i okolo jednoho metru. V těchto systémech molekuly směsi procházejí ve značné rychlosti napříč rezonátorem a ochlazené se navrací zpět k dalšímu využití. Vzhledem k velkým vnitřním výkonům (hodnoty až několika desítek kW) se jako rezonátor používají zlatem napařená kovová zrcadla s výstupním otvorem o průměru okolo jednoho i více milimetrů nebo se zrcadla napařují na germaniové tepelně dobře chlazené podložky, které vykazují dostatečně dobrou propustnost pro vlnovou délku 10,6 μm a velmi dobře odvádějí absorbované teplo.

V této oblasti probíhal výzkum s cílem dosáhnout dostatečně vysokých výkonů pro průmyslové aplikace. Systém (nazvaný *Adéla*), který jsme sestavili v r. 1966,

3 $P(J)$ odpovídá přechodu z vyššího vibračního stavu z rotační hladiny s nižším kvantovým číslem J na vibrační stav nižší a rotační hladinu s vyšším kvantovým číslem. $R(J)$ odpovídá přechodu z vyššího vibračního stavu z rotační hladiny s vyšším kvantovým číslem J na nižší vibrační stav a rotační hladinu s nižším kvantovým číslem J .

» Ve druhé polovině šedesátých let vzniká v oddělení kvantové elektroniky program molekulárních laserů. «



Obr. 10 Laboratoř CO₂-N₂-He laserů. V popředí laser o výkonu 200 W (pojmenovaný *Barnabáš*).

disponoval výkonem 100 W. K optimalizaci laserových parametrů jsme měli k dispozici řadu laserových trubic o různých průměrech s kovarovými úchytkami⁴. Později postavený CO₂ laser (pojmenovaný *Barnabáš*) dosáhl výkonu až 200 W (obr. 10) [37]. Používala se zrcadla obojího typu. Navíc jsme měli možnost připojit na kovarovou úchytka laserové trubice koncovky s Brewsterovými okénky z materiálů KCl nebo NaCl⁵, a tak se pomocí vloženého hranolu zabývat spektrální konfigurací generovaného záření. Sledovaly se základní parametry postavených systémů jak v kontinuálním režimu, tak také v klíčovaném impulzním režimu, který jsme realizovali pomocí rotujícího zrcadla [38]. Šířka generovaného impulsu v základním módu TEM₀₀ byla nepřímou úměrnou otáčkám zrcadla, což velmi dobře odpovídalo naší předložené teoretické úvaze.

Z rozhodnutí ředitele Zimy byly však tento i další programy z oboru laserů od ledna 1972 zmrazeny, experimentální základna rozebrána a laboratoře zlikvidovány. Po určité době probíhalo ještě vyhodnocování dosažených výsledků a dopisovala se disertační práce [39].

Z oblasti molekulárních laserů byla věnována pozornost také diatomickým molekulám. Vznikla podrobná analýza budících mechanismů pro molekulu CO. Tato úvaha, přednesená na laserové konferenci v Berlíně [40], diskutovala excitační mechanismy, zejména vybuzení molekuly CO do dubletového systému metastabilními heliovými atomy ze stavů 2³S a heliovými ionty ze stavu He²⁺. Tyto mechanismy se posuzovaly s ohledem na vznik parciální inverze na elektronově-vibračních přechodech v pásmech Baldet-Johnson, Comet-Tail a prvním negativním. Zdálo se, že navr-

⁴ Vyrobeno ve výzkumném ústavu Tesla-VUVET.

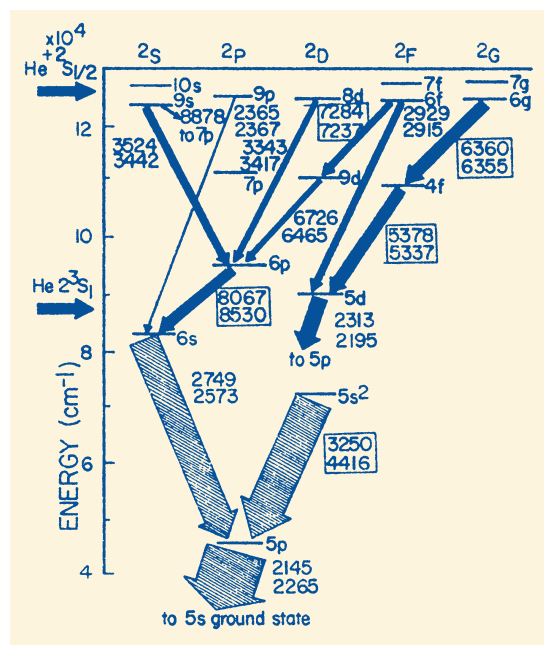
⁵ Tyto materiály vykazují minimální ztráty při průchodu vlnové délky 10,6 μm.

žený princip by mohl být vhodný pro iontový molekulární laser s generací stimulované emise na rotačně-vibračních přechodech v zeleném až ultrafialovém spektrálním oboru.

Koherentní záření na modré vlnové délce

Zajímavou prací, která probíhala v naší laboratoři jako paralelní program z oboru plynových laserů, byl iontový heliokadmiový laser, který jsme v týdenním „maratonu“ uvedli do provozu k oslavě 15. výročí založení ÚŘE ČSAV v roce 1970 [41]. Kadmiový laser pracuje s ionty kadmia v trubici naplněné heliem. Kadmium se odpařuje do prostoru laserové trubice z reservoáru, který je umístěn poblíž anody. K rozptýlení iontů po délce výbojové trubice se využívá katarforeze, tj. pohybu nabitých částic kadmia v elektrickém poli výboje směrem ke katodě. V blízkosti katody kadmium kondenzuje na relativně chladných stěnách koncovek kapiláry. Proces excitace kadmia na výchozí hladinu 5s²D_{5/2} pro kontinuální generaci modrého světla o vlnové délce 441,6 nm je způsoben jak srážkovým mechanismem v důsledku tzv. Penningovy reakce mezi excitovaným singletovým (He*2¹S₀) a tripletovým (He*2³S₁) stavem helia a základním stavem Cd (5s²S₀), tak také reakcemi asymetrického přenosu náboje z heliového iontu (He⁺²S_{1/2}) procesem kaskádních přechodů z vyšších ionizovaných hladin CdII (viz obr. 11). Vlnová délka modrého světla je v kontinuálním režimu tohoto laseru jeho nejkratší viditelnou délkou, ostatní možné kontinuální přechody leží v zelené, červené a infračervené spektrální oblasti. Penningův proces umožňuje kontinuální generaci i z druhé výchozí hladiny 5s²D_{3/2} na ultrafialové vlnové délce 325,0 nm.

Technické řešení tohoto problému vedlo k použití trubice o průměru kapiláry asi 2 mm a délce 1 m. Trubice byla naplněna heliem na tlak 2 torr a vložena do 1,5 m dlouhého Fabryho-Pérotova rezonátoru (obr. 12). Při proudu 100 mA byl naměřen výkon laseru 10 mW. Píčka k odpařování kadmia byla stabilizována na teplotu asi 240 °C. Zvolili jsme selektivní dielektrická zrcadla s vy-



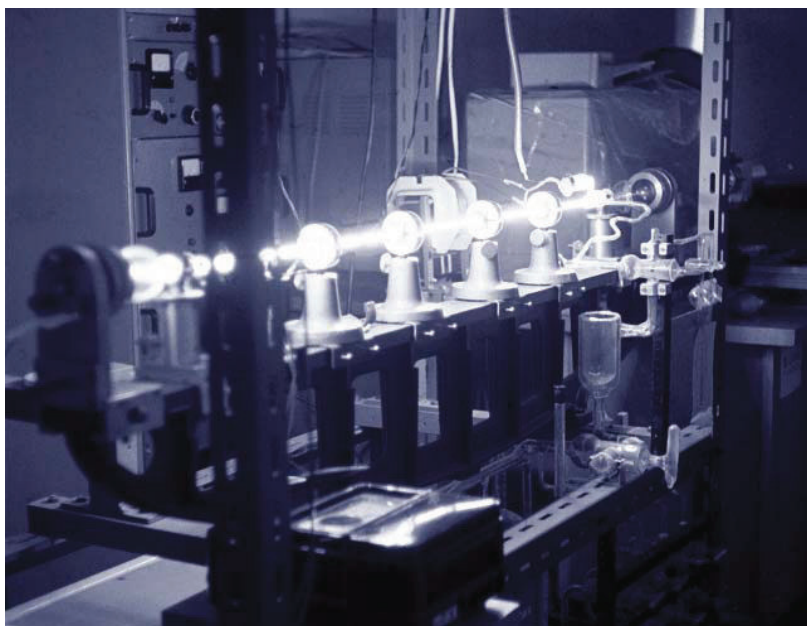
Obr. 11 Mechanismus excitace kadmia srážkami s heliem na vyšší energetické hladiny CdII (podle [42]). (Pevné čáry – excitace ionty He*, šrafované plochy – excitace Penningovou reakcí, vlnové délky uzavřené v hranatém boxu reprezentují kontinuální režim.)

sokou odrazivostí⁶, abychom dosáhli žádoucí generace. Stálost výkonu laseru v rozmezí 5 % vyžadovala stabilizaci teploty zdroje kadmia asi na 1,5 % při dostatečně širokém rozsahu proudových změn (až 20 %) [43].

Lasery s laditelnou vlnovou délkou

Lasery založené na využití organických barviv byly posledním programem řešeným v rámci oddělení kvantové elektroniky. V této oblasti jsme spolupracovali se dvěma studenty, jedním doktorandem a odborným vědeckým pracovníkem z FJFI ČVUT. Program zahrnoval řadu experimentálních měření vlastností organických xanthenových barviv (rhodamin B, rhodamin 6G, fluorescein) a coumarinu 120, rozpuštěných do vhodných koncentrací (10^{-5} až 10^{-2} mol/l) v některých rozpouštědlech (voda, alkohol, ethylenglykol) [44–46]. Barviva vykazují zajímavé fluorescenční vlastnosti v oblasti viditelného světla mezi 400 až 500 nm a lze je využít k realizaci jak impulzního, tak i kontinuálně pracujícího laseru s možným laděním vlnové délky. Pro ověření fyzikálních vlastností uvedených barviv se použil impulzní argonový laser (vlnové délky 488 nm, 514 nm) a superradiační dusíkový impulzní laser o vlnové délce 337 nm [47]. Byl zaznamenán posuv maxima fluorescenční intenzity k delší vlnové délce při koncentracích vyšších než $5 \cdot 10^{-5}$ mol/l. Maximum fluorescence se u většiny použitých rozpouštědel posouvá s koncentrací asi o 8 nm/dekádu. Rovněž byl zjištěn vliv roztoku na posuv maxima vlnových délek fluorescenční intenzity: činil 10 až 15 nm pro případ, kdy se použila voda, alkohol nebo ethylenglykol. Rovněž kyselost roztoku ovlivňuje jak polohu maxima fluorescenční intenzity, tak také její velikost. Spektroskopická měření absorpčních spekter ukázala, že absorpční srážkové průřezy pro R6G a fluorescein jsou prakticky nezávislé na koncentraci barviv, zatímco u rhodaminu B je tato závislost výrazná. To je patrně spojeno s tvorbou dimérů. Emisní srážkové průřezy jsou určeny zrcadlovou symetrií absorpčních srážkových průřezů, a tak pro výpočet profilů zisku byly touto cestou získány všechny potřebné parametry. V impulzním režimu s excitací pomocí dusíkového laseru (délka impulzu několik ns) byly výpočtem stanoveny ziskové profily a pro jednotlivá barviva a zvolenou dílčí populaci excitovaného prvního singletového stavu ($n_1 = 0,01 \text{ cm}^{-1}$) vlnové číslo maxima zisku a rozsah ladění vlnové délky. Pro xanthenová barviva lze přeladit vlnovou délku o hodnotu až 10 %, zatímco v případě coumarinu 120 lze dosáhnout ladicího rozsahu až 25 %. Dosažené výsledky jsou patrné ze záznamu generovaného spektra impulzního barvivového laseru s nízkým Q-faktorem rezonátoru (obr. 13). Použila se koncentrace barviv $5 \cdot 10^{-3}$ (na okraji obr. 13 plně čáry) a $1 \cdot 10^{-2}$ mol/l (přerušované čáry). Je patrný značný rozdíl v laditelnosti vlnové délky mezi xanthenovými barvivy a coumarinem 120.

Na základě těchto výsledků jsme navrhli několik postupů pro realizaci třízrcadlového systému s kyvetou s organickým barvivem a excitací dusíkovým laserem (impulzní režim) [48] nebo pro kontinuální generaci s průtokem barviva napříč takovým rezonátorem. K dosažení homogenity aktivního prostředí při tomto průtoku byla navržena tryska, kterou roztok protékal v režimu laminárního proudění. Příslušný roztok



Obr. 12 Kadmiový laser generující modré koherentní záření 441,6 nm (ÚŘE-ČSAV 1970).

protékající napříč rezonátorem recirkuloval a po termalizaci se vracel opět k dalšímu využití. K fokusaci čerpacího záření do aktivního prostředí se předpokládalo použít již osvědčených postupů pomocí tenké nebo tlusté čočky. K ladění vlnové délky byl navržen systém s využitím Brewsterova hranolu vloženého do rezonátoru laseru.

Ukončení programu kvantové elektroniky v ÚŘE ČSAV

„Normalizační proces v ÚŘE ČSAV,“ vzpomíná (VT), „zasáhl oddělení kvantové elektroniky velice citelně. Koncem roku 1970 bylo oddělení kvantové elektroniky oficiálně zrušeno v důsledku naší angažovanosti v obrodném procesu v letech 1968–9. Jednotliví pracovníci byli přeraženi a nebo dokonce museli ústav opustit. Podařilo se mi předat fungující masery na ČVUT k prof. Tyslovi a do Technického muzea. Já jsem měl po dobu 4 let po každoročních prověrkách roční smlouvy (jen díky své angažovanosti v tělovýchově) a pracoval jsem na rentgenové spektroskopii a strukturní analýze, později pak na přípravě preforem pro tažení skelných vláken a konečně na technologii a výrobě plošných spojů. V únoru 1990 jsem byl zvolen do funkce ředitele ÚŘE ČSAV a v červnu jsem byl prezidiem do této funkce jmenován. Při redukci ústavů v r. 1992 se mi podařilo existenci ústavu uhájit, ne však obnovit výzkum v kvantové elektronice.“

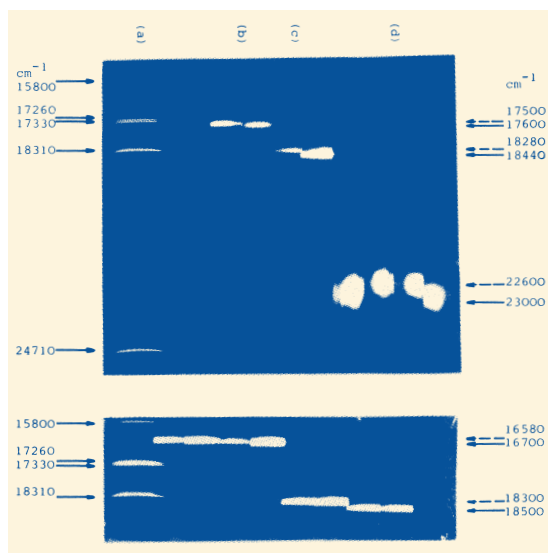
K likvidaci programu laserů v ÚŘE ČSAV poznamenává (JB):

„V našem laserovém glosáři, ve kterém jsme zaznamenávali spíše humorné události, které se v průběhu našich prací udály, se s datem 11. 1. 1972 můžeme dočíst o vzkazu, který jsem dostal od sekretárky ředitele Zimy (pí B.):

„... sdělte (vědeckému atašé Bulharské republiky – moje pozn.), že my v laserech nepracujeme, a odkážte jej na Ústav přístrojové techniky v Brně.“ O něco později jsem od ředitele zákaz další činnosti v oblasti laserů dostal přímo. Poněvadž ústav vychovával v tomto oboru ještě jednoho egyptského aspiranta (byl jsem jeho školitelem), bylo ještě možné se po určitou dobu věnovat ukončení jeho vědecké aspirantury, i když jenom v teoretické oblasti. Naše dvě experimentální laboratoře byly vyklizeny, rozebrané aparatury přeneseny do ústavního skladu(?)

6 Pro naše experimentální práce byla dielektrická zrcadla realizována díky mimořádně úspěšné spolupráci se Z. Knittem z ÚVOJM Přerov.

» Likvidace programu kvantové elektroniky v ÚŘE ČSAV byla velmi promyšlenou politickou kalkulací. «



Obr. 13 Spektra impulzního barvivového laseru. Koncentrace barviv: 5×10^{-3} mol/l (plné čáry), 1×10^{-2} mol/l (přerušované čáry); (a) kalibrační čáry, (b) rhodamin 6G, (c) Na-fluorescein, (d) coumarin 120, (e) rhodamin B [46].

a uloženy v bedně asi 5 m dlouhé a 2,5 m široké. Všechno bylo zatlučeno a nebyl k ničemu přístup. Tam přežily několik let. S postupem času byl dohodnut převod zařízení do Tesly-VUVET, kam byli převedeni i dva pracovníci ze skupiny laserového programu. Další dva pracovníci byli rozptýleni na různá pracoviště v ústavu, český vědecký aspirant se jako jediný dostal do dalšího ústavu ČSAV. Já jsem měl složitější situaci, poněvadž z prověrek 1970 mně bylo sděleno: „Až budeme mít za tebe náhradu, budeš muset z ústavu odejít.“ Tato situace se prodlužovala až do r. 1975, kdy jsem musel ústav opustit. Do r. 1977 jsem žádnou odbornou profesí nevykonával. V druhé polovině roku 1977 jsem se dostal do Československého metrologického ústavu (ČMI) s pracovištěm v Praze (a to díky tomu, že vedení ČMI sídlilo v Bratislavě) – a od této doby nastává pro mne velmi plodné období v aplikaci laserové fyziky na systémech jodem stabilizovaných He-Ne laserů pro tehdy mezinárodně připravovanou redefinici základní jednotky délky – metru.“

Po postupném rozboru všech pro a proti jsme došli k závěru, že likvidace programu kvantové elektroniky v ÚŘE ČSAV nebyla dílem neuváženým ani snahou o efektivnější distribuci této problematiky v rámci ústavů ČSAV, nýbrž – a to především – velmi promyšlenou politickou kalkulací, na níž se podílel dosti výrazně okresní výbor „strany“ a někteří bývalí straniční pracovníci ústavů ČSAV.

Takové postupy se samozřejmě vyskytovaly i v některých dalších ústavech ČSAV, kdy slibně se rozvíjející programy byly likvidovány nebo jinak zmařeny.

LITERATURA

- [1] T. H. Maiman: Nature **187**, 493 (1960).
- [2] T. H. Maiman: Phys. Rev. **123**, 1145 (1961).
- [3] A. L. Schawlow, C. H. Townes: Phys. Rev. **112**, 1940 (1958).
- [4] A. Einstein: Phys. Z. **18**, 121 (1917).
- [5] C. E. Cleeton, N. H. Williams: Phys. Rev. **45**, 234 (1934).
- [6] D. M. Dennison, J. D. Hardy: Phys. Rev. **39**, 313 (1932).
- [7] C. H. Townes: Phys. Rev. **70**, 665 (1946).
- [8] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes: Phys. Rev. **95**, 282 (1954).
- [9] N. G. Basov, A. M. Prochorov: ŽETF **27**, 282 (1954).

- [10] E. K. Zavojskij: J. Phys. SSSR **9**, 211 (1945).
- [11] J. Tolman, V. Ptáček, V. Souček, R. Stecher: IEEE Trans. Instr. Meas. **IM-16**, 247 (1967).
- [12] V. Trkal: Čs. čas. fyz. **7**, 453 (1957).
- [13] V. Trkal: Czech. J. Phys. **7**, 770 (1957).
- [14] V. Trkal: „Versuchsergebnisse mit zwei Amoniaklasern“, Act. Congr. Inter. Cronométr., Lausanne, 365 (1964).
- [15] K. Shimoda, T. Nishikawa, R. Itoh: J. Phys. Soc. Jap. **9**, 974 (1954).
- [16] V. Trkal: Čs. čas. fyz. **47**, 313 (1997).
- [16a] V. Trkal: Biochem. Bioenerg. **48**, 321 (1999).
- [17] Kolektiv: *Kvantová elektronika*. Academia, Praha, 1968.
- [18] J. Blabla, T. Šimeček, V. Trkal: *Kvantové generátory*. SNTL, Praha, 1968.
- [19] V. Trkal: *Stavba atomů a molekul*. SNTL, Praha 1968 a 1980.
- [19a] V. Trkal: *Electronic Structure of Atoms and Molecules*. ILIFFE BOOKS, London, 1969.
- [20] V. Trkal: Čs. čas. fyz. **44**, 83 (1994).
- [21] J. Blabla, J. John, A. Jelínková, J. Vendl: Čs. oftalmol. **21**, 281 (1965).
- [22] J. John, J. Blabla: Čs. oftalmol. **23**, 293 (1967).
- [23] J. Blabla: Postepy fiz. **18**, 185 (1967).
- [24] J. Blabla, J. John: Čs. pracovní lékařství **21**, (1969).
- [25] J. Kolář, A. Babický, J. Blabla: Experientia **25**, 365 (1969).
- [26] J. Blabla: Čs. čas. fyz. **A26**, 299 (1976).
- [27] J. John, J. Blabla: Am. J. Ophthal. **62**, 659 (1966).
- [28] V. Soukup et al.: Použití rubínového laseru v očním lékařství. In: *Laser a jeho použití DT ČSVTS*. Praha 1969.
- [29] J. Blabla, V. Soukup: Slaboproudý obzor **31**, 263 (1970).
- [30] J. Blabla, V. Soukup: Čs. čas. fys. **A20**, 328 (1970).
- [31] J. John, V. Soukup: Služba zdravotníkům **10**, 206 (1969).
- [32] J. John: *Zpráva o zkušenostech s kvantovým koagulatorem ÚŘE-ČSAV*. Zpráva oční kliniky ILF, Praha, červenec 1968.
- [33] J. John: Čs. oftalmol. **26**, 229 (1970).
- [34] *Kvantová koagulace oční sítnice*. Krátký film Ústavu zdravotní výchovy v Praze, režisér V. Kabelík (1971).
- [35] J. Blabla, A. Jelínková, V. Soukup: Posouzení optické kvality krystalových výbrusů CaF₂:Sm²⁺ z funkčních parametrů samariového laseru za teploty 77°K. Sborník II. semináře o monokrystalech na Hrubé Skále (1967).
- [36] C. K. N. Patel: Appl. Phys. Lett. **7**, 15 (1965).
- [37] J. Blabla et al.: Molekulární CO₂-laser a jeho praktické použití. In: *Laser a jeho použití*. DT ČSVTS, Praha (1969).
- [38] P. Engst, J. Blabla: Čs. čas. fyz. **A22**, 114S (1972).
- [39] P. Engst: *Rozbor a měření ziskových charakteristik aktivního prostředí CO₂-laseru*. Disertační práce, ČSAV-ÚŘE, 1974.
- [40] J. Blabla: Anregungsmechanismen linearer Kohlenmonoxid-Moleküle in Gaslasernmedien. Konference *Laser und ihre Anwendungen*, Berlin (1966).
- [41] J. Blabla: Čs. čas. fyz. **A20**, 462 (1970).
- [42] C. E. Webb, A. R. Turner-Smith, J. M. Green: J. Phys. **B3**, L134 (1970).
- [43] J. Blabla, V. Bajgar: Čs. čas. fyz. **A22**, 113S (1972).
- [44] J. Blabla, V. Sochor, A. Jelínková: Opt. Applicata **III**(4), 15 (1973).
- [45] J. Blabla, A. Jelínková, V. Sochor, V. Tinák: 2nd International Conference on „Lasers and their Applications“ (K144), Dresden, Juni 1973.
- [46] J. Blabla, V. Sochor, P. Mráz, M. M. El Zalabani, A. Jelínková: Physical properties of selected laser dyes. In: Proc. of the ICO-10, Prague, 863 (1975).
- [47] P. Engst, V. Sochor, J. Veselý, P. Mráz, V. Klinský: Acta polytechnica **IV**, 93 (1978).
- [48] M. M. El Zalabani: *Organic laser dye system and analytical model applied to the tuning methods with step-wise design and construction*. Disertační práce, ČSAV-ÚŘE, 1975.