

PETDESETLETNICA LASERJEV

JANEZ STRNAD

Fakulteta za matematiko in fiziko

Univerza v Ljubljani

PACS: 01.65.+g

Pred petdesetimi leti se je začelo lasersko obdobje, ki je prineslo veliko novega v znanost, tehniko in vsakdanje življenje. Pomembni koraki na poti do njega so bili napoved stimuliranega sevanja ter izumi maserja in rubinskega ter helij-neonskega laserja.

THE FIFTIETH ANIVERSARY OF LASERS

Fifty years ago the laser era began which brought many a novelty into science, technology, and everyday life. Important steps on the way to it were the prediction of stimulated emission and the invention of the maser and the ruby and He-Ne laser.

Stimulirano sevanje

Na koncu 19. stoletja so na Državni fizikalno-tehniški ustanovi v Berlinu vse natančneje merili spektralno gostoto v sevanju črnega telesa. Za teoretično ozadje je poskrbel Wilhelm Wien. V prvem koraku je leta 1893 obravnaval sevanje v valju z idealno odbojnimi stenami z batom. Ugotovil je, da je kvocient frekvence, pri kateri ima spektralna gostota vrh, in absolutne temperature T konstanten. Uvidel je, da je v splošnem spektralna gostota odvisna od funkcije kvocienta ν/T , pomnožene s tretjo potenco frekvence ν . Tri leta pozneje je to funkcijo izrazil po zgledu Maxwelllove porazdelitve molekul po hitrosti:

$$u = \frac{dw}{d\nu} = \nu^3 f(\nu/T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} e^{-h\nu/kT}. \quad (1)$$

w je povprečna gostota energije v sevanju ter h Planckova in k Boltzmannova konstanta.

Najprej se je zdelo, da merjenja podpirajo *Wienovo enačbo*. Potem pa so pokazala, da je pri konstantni majhni frekvenci spektralna gostota sorazmerna s temperaturo. Na tej podlagi je leta 1900 Max Planck prek entropije sevanja Wienovo enačbo dopolnil v *Planckov zakon*:

$$u = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (2)$$

Wienova enačba je približek zakona za $h\nu/kT \gg 1$. Konstante v (1) smo naravnali po tem.

Sevanje sodeluje s snovjo. Mislimo na množico atomov kakega elementa in se omejimo na dve stanji. Opis ne velja samo za dve stanji atoma v plinu, ampak tudi za molekule, atome primesi v kristalu izolatorja in elektrone v kristalu polprevodnika. Prvo stanje naj ima manjšo energijo W_1 , drugo pa večjo W_2 . Atom v stanju z večjo energijo seva sevanje s frekvenco $\nu = (W_2 - W_1)/h$. Atom v stanju z manjšo energijo v sevanju s spektralno gostoto $u = u(\nu)$ absorbira sevanje s to frekvenco. Naj bo N_2 atomov v stanju z večjo energijo in N_1 atomov v stanju z manjšo. V časovni enoti $N_2 A$ atomov s sevanjem iz stanja z večjo energijo preide v stanje z manjšo in $N_1 B_{12} u$ atomov z absorpcijo iz stanja z manjšo energijo v stanje z večjo. $A = A_{21}$ ima vlogo verjetnosti na časovno enoto za prehod atoma s sevanjem in $B_{12} u$ za prehod atoma z absorpcijo. V toplotnem ravnovesju s sevanjem toliko atomov iz stanja z večjo energijo preide v stanje z manjšo, kot jih v tem času z absorpcijo preide iz stanja z manjšo energijo v stanje z večjo:

$$N_2 A = N_1 B_{12} u. \quad (3)$$

V ravnovesju je po Maxwell-Boltzmannovem zakonu v stanju z večjo energijo manj atomov kot v stanju z manjšo: $N_2/N_1 = e^{-(W_2-W_1)/kT} = e^{-h\nu/kT}$. To upoštevamo v zvezi (3) in iz enačbe (1) razberemo: $A/B_{12} = 8\pi h\nu^3/c^3$.

Zveza (3) ustreza Wienovi enačbi, ne pa Planckovemu zakonu (2). Po tem sklepamo, da poleg sevanja, ki ga imenujmo *spontano*, in absorpcije obstaja še tretji pojav. Po zgradbi zakona sklepamo, da gre za prehod iz stanja z večjo energijo v stanje z manjšo kot pri spontanem sevanju. Vendar ta prehod povzroči sevanje s pravo frekvenco, kakršno je udeleženo pri absorpciji. Prehod imenujmo *stimulirano sevanje*. Zvezi (3) zato dodamo število atomov $N_2 B_{21} u$, ki v časovni enoti s stimuliranim sevanjem iz stanja z večjo energijo preide v stanje z manjšo:

$$N_2 A + N_2 B_{21} u = N_1 B_{12} u. \quad (4)$$

$B_{21} u$ imamo za verjetnost na časovno enoto za prehod atoma s stimuliranim sevanjem. Enačba (4) ustreza Planckovemu zakonu, če poleg zapisane zveze velja še [1]:

$$B_{12} = B_{21} = B, \quad \frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}. \quad (5)$$

Vzeli smo, da stanji nista degenerirani, se pravi, da dani energiji ustreza eno samo stanje. Zvezi (5) je izpeljal Albert Einstein leta 1916 in A in B sta *Einsteinova koeficienta*. Imeni spontano in stimulirano sevanje sta novejši.

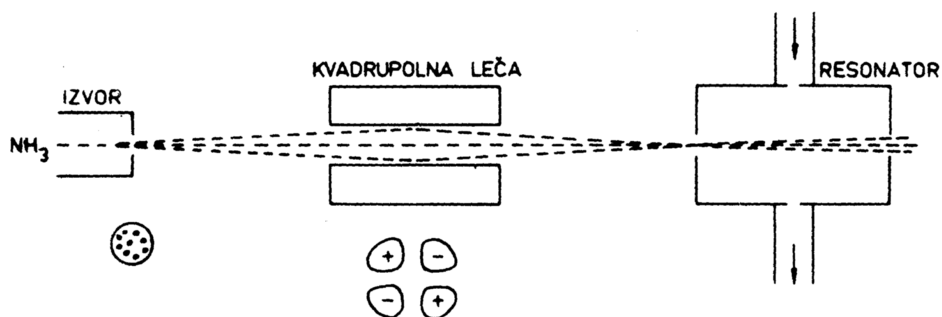
Tokovi, ki ustrezajo spontanemu in stimuliranemu sevanju ter absorpciji, so sorazmerni z N_2A , N_2Bu in N_1Bu . Tako sta tokova spontanega in stimuliranega sevanja v razmerju $A/(Bu) = e^{h\nu/kT} - 1$ in tokova absorpcije in stimuliranega sevanja v razmerju $N_1/N_2 = e^{h\nu/kT}$. Eksponentni faktor je pri sobni temperaturi za vidno svetlobo zelo velik, tako da je delež stimuliranega sevanja zanemarljiv. Spočetka so mislili, da je stimulirano sevanje teoretična posebnost brez praktičnega pomena. V ravnovesju zagotovo ni mogoče doseči, da bi se ta delež povečal. Atome je treba neprekinjeno motiti od zunaj, tako da je v stanju z večjo energijo več atomov kot v stanju z manjšo. V taki *obrnjeni zasedenosti* se poveča delež stimuliranega in spontanega sevanja v primeri z deležem absorpcije. Poleg tega je treba doseči veliko gostoto energije v valovanju s pravo frekvenco, kar poveča delež stimuliranega sevanja in absorpcije v primeri z deležem spontanega sevanja.

Stimulirano sevanje je pomembno. Atomi v razredčenem plinu spontano sevajo neodvisno drug od drugega valovne poteze v različnih smereh in z različno smerjo polarizacije. Atomi se neurejeno gibajo z različnimi hitrostmi, tako da se zaradi Dopplerjevega pojava frekvence potez med seboj nekoliko razlikujejo. Nastalo zmešnjavo valovnih potez imenujemo *nekoherentno valovanje*. Tako je tudi sevanje trdnih svetil, ker njihovi deli sevajo neodvisno drug od drugega. Stimulirano izsevano valovanje pa ima enako smer, enako frekvenco in enako polarizacijo kot valovanje, ki ga je zbudilo. Tako pri stimuliranem sevanju nastane *koherentno valovanje*, ki ga vsaj v delu lahko opišemo z izrazom za krogelno ali ravno valovanje.

Maser

Posamezni fiziki so se spraševali, ali bi bilo mogoče zaznati stimulirano sevanje. Poskusi v letih 1928, ko je Rudolf W. Ladenburg potrdil stimulirano sevanje, 1939, ko je Valentin A. Fabrikant napovedal ojačevanje kratkih valov s stimuliranim sevanjem, 1947, ko sta Willis E. Lamb in R. C. Retherford demonstrirala stimulirano sevanje v vodikovem spektru, in 1950, ko je Alfred Kastler predlagal način optičnega črpanja, so kazali napredek, a niso zbudili posebnega zanimanja. Preboj je povzročil *maser*. Ime sestavljajo začetne črke angleških besed ojačevanje mikrovalov s stimuliranim sevanjem. O zamisli maserja sta leta 1952 na sestanku za radijsko spektroskopijo poročala Aleksandr M. Prohorov in njegov mlajši sodelavec Nikolaj G. Basov s fizikalnega inštituta P. N. Lebedev v Moskvi. Ugotovitve sta objavila leta 1954. Neodvisno od teh ugotovitev so na newyorški univerzi Columbia v letih 1954 in 1955 Charles H. Townes in mlajša sodelavca James P. Gordon in Herbert J. Zeiger izdelali *maser na curek molekul amoniaka*. Nekateri

znani fiziki, ki so poznali načrte, so menili, da jim to ne bo uspelo.



Slika 1. V amoniakovem maserju skozi drobne šobe izhaja curek molekul. Kvadrupolna električna leča izloči molekule v osnovnem stanju. Curek molekul v vzbujenem stanju vstopi v resonator, v katerem vpadno valovanje s pravo frekvenco vzbudi stimulirano sevanje. Zaznavajo ojačeno sevanje, ki zapusti resonator.

Molekula amoniaka NH_3 ima osnovno stanje razcepljeno na dve bližnji stanji, za prehod med katerima je značilna frekvenca $23,87 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ ali valovna dolžina 1,256 cm na območju mikrovalov. V curku molekul amoniaka pri sobni temperaturi je za malenkost več molekul v stanju z manjšo energijo kot v stanju z večjo. V nehomogenem električnem polju molekule v stanju z manjšo energijo silijo na območje z manjšo jakostjo polja, molekule v stanju z večjo pa na območje z večjo. Po cevi z luknjičasto šobo so vodili amoniak z območja s tlakom okoli milibara na območje z veliko manjšim tlakom skozi kvadrupolno električno lečo. Molekule v stanju z manjšo energijo so se odklonile od osi, molekule v stanju z večjo energijo pa proti osi. Curek molekul, v katerem so prevladale molekule v stanju z večjo energijo, so speljali v votlini resonator. Sevanje s pravo frekvenco, ki so ga po valovnem vodniku pravokotno na smer curka molekul uvedli v resonator, je povzročilo stimulirano sevanje molekul. Ojačeno sevanje je na nasprotni strani po valovnem vodniku zapustilo resonator. S takim ojačevalnikom je postalo mogoče ojačevati energijske tokove s tisočkrat manjšo gostoto energije kot z ojačevalnikom z elektronko.

Danes maserje s curkom molekul, na primer vodika, rabijo kot oscilatorje z izredno stabilno frekvenco. V ojačevalnikih pa izkoriščajo kristale v magnetnem polju pri temperaturi tekočega helija. Paramagnetnemu kristalu primešajo diamagnetne atome s tremi spinskimi stanji, na katera se zaradi Zeemanovega pojava razcepi dano stanje. Taki ojačevalniki so pomembni pri sprejemu sporočil z umetnih satelitov in vesoljskih sond [2].

Na poti do laserjev

Po uvedbi maserjev so po svetu, posebno v Združenih državah, veliko razmišljali o možnosti, da bi razširili njihovo delovanje na območje vidne svetlobe. Pri tem so naleteli na nekaj ovir. Vidna svetloba ima več kot dvajsettisočkrat večjo frekvenco od mikrovalov. Molekule amoniaka sevajo v povprečju po stotino sekunde, povprečni čas sevanja atomov pa je milijonkrat krajši.

Leta 1957 se je Townes pogovarjal z Gordonom Gouldom, ki si je že nekaj časa prizadeval doktorirati na univerzi Columbia in je raziskoval tedaj novo tehniko zbujanja atomov s svetlobo. Pogovor se je sukal okoli „optičnih maserjev“ in prijave patentov. Gouldu se je porodila zamisel, kako bi s svetlobo zbuja atome, da bi prehajali iz stanja z manjšo energijo v stanje z večjo. V laboratorijskem dnevniku je opisal zamisel za to *optično črpanje* in še številne druge zamisli, med njimi tudi zbujanje s trki. Dnevnik je overil pri notarju. Zapustil je univerzo in se zaposlil pri manjši družbi Technical Research Group, TRG, ki je delala za vojsko in ki je bila pripravljena izvesti njegove načrte. Vendar Gould pri njih ni mogel neposredno sodelovati, ker kot levičar ni smel delati pri zaupnih nalogah. (Zaradi tega je med drugo svetovno vojno zgubil mesto v Los Alamosu.)

Townes je bil tudi svetovalec Bellovih laboratorijev v Murray Hillu v New Jerseyju. V njih je delal njegov svak Arthur L. Schawlow, ki je prej pri njem doktoriral. Poleti 1958 sta v članku *Infrardeči in optični maserji* pregledala načelne možnosti za take naprave in še posebej za napravo s kalijevo paro ter prijavila patent. Članek je v Združenih državah zbudil veliko zanimanja in vzpodbudil nekaj znanstvenih sestankov. Za „orožje s curki“ se je začela zanimati tudi ameriška vojska in je podprla raziskovalne naloge ter znanstvene sestanke s to usmeritvijo.

Townes, Schawlow in Gould ter Basov in Prohorov so, delno neodvisno drug od drugega, uvideli, da votliniski resonator pri svetlobi ni uporaben. V njem je mogočih preveč bližnjih lastnih nihanj. Predlagali so „odprt resonator“ Fabry-Perotove vrste med vzporednima zrcaloma, med katerima nastane stoječe valovanje v smeri pravokotno na zrcali. Razdalja med zrcaloma mora biti celoštevilski večkratnik polovične valovne dolžine. V stoječem valovanju naraste gostota energije pri frekvenci prehoda. K temu valovanju prispeva stimulirano sevanje, ki ga sproži spontano sevanje enega od atomov. Pri obrnjeni zasedenosti se stimulirano sevanje ojačuje in prevlada nad spontanim sevanjem in absorpcijo, če je zbujanje dovolj izdatno. Do tega pride lahko le, če so vključena tri ali štiri stanja, dve stanji ne zadostujeta.

Na znanstvenem sestanku sredi leta 1959 je Gould v svojem poročilu

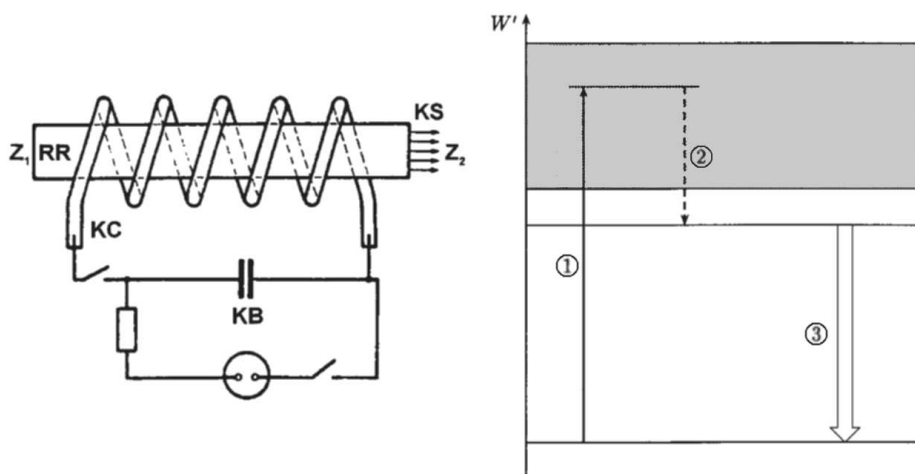
prvič uporabil ime laser, v katerem je „mikrovalove“ v „maserju“ nadomestil s „svetlobo“. Schawlow, ki je bil znan kot šaljivec, je zatrdil, da naprava bolj kot ojačevalnik deluje kot oscilator. Zato naj bi ji rekli loser (zguba). Schawlow se je motil tudi nekaj mesecev pozneje. Na sestanku je obravnaval lastnosti rubina, to je aluminijevega oksida s primesjo kroma. Obetaven se mu je zdel temni rubin z izdatno primesjo kroma, ne pa rožnati rubin z majhno primesjo kroma.

Raziskovalci v industrijskih laboratorijih ali industrijske družbe navadno novo spoznanje prijavijo kot patent. Pogosto pride do patentnih sporov. Tak spor, v katerega se je zapletel Gould, je trajal trideset let. On in njegova družba sta prvi patent prijavila leta 1959 in v letih 1977 in 1979 dobila priznanih nekaj patentov. Prišlo je do zaslišanj, razprav in pritožb na patentnem uradu in na sodiščih. Dogodkov ni lahko pregledati, ker so nekatere družbe prešle v last drugih družb in so ustanavljali nove. Pravdanje se je vlekel in doživelo nekaj nenavadnih obratov. Nazadnje je leta 1985 doseglo zvezno sodišče v Washingtonu in se končalo dve leti zatem. V celoti so Gouldu nazadnje priznali 48 patentov, tudi patente za optično črpanje, zbujanje s trki in Brewstrove okenci. Gould je vmes svoje pravice prodal, da je kril stroške za pravdanje. Pozneje jih je odkupil nazaj, ko je družba zašla v težave. Na koncu naj bi dobil več milijonov dolarjev. Številnim laserskim strokovnjakom se zdijo nekatere sodne odločitve sporne [3–5].

Rubinski laser

Theodore H. Maiman je v Letalski družbi Hughes v Malibuju v Kaliforniji izdelal uspešen maser z rožnatim rubinom. Ni se oziral na razširjeno mnenje, da tak rubin ni uporaben za laser. Kristal rubina je na vzporednih osnovnih ploskvah posrebril. Ena od ploskev je bila popolnoma posrebrena, druga je prepuščala majhen del vpadne svetlobe. Kristal je obdal z vijačno ksenonovo cevjo, kakršne uporabljajo v fotografskih bliskavkah. Naelektren kondenzator je spraznil skozi cev, da je nastal močan svetlobni blisk. Povzročil je, da so atomi kroma z absorpcijo prešli v stanja z veliko energijo. Redki atomi kroma v kristalu so prevzeli vlogo atomov v razredčenem plinu. Zaradi sodelovanja s kristalno mrežo so atomi izgubljali energijo. Tako je nastala obrnjena zasedenost med sosednjima stanjema. Kak atom je spontano seval. Sevanje se je odbijalo na posrebrjenih mejnih ploskvah in v kristalu je nastalo stoječe valovanje. To je povzročalo stimulirano sevanje, ki se je ojačevalo. Skozi slabše posrebrjeno mejno ploskev je kristal izseval sunek rdeče koherentne svetlobe. Ob ponovnem blisku je nastal nov sunek. Sredi maja 1960 je Maiman opazil, da se je izrazito povečala moč sunka in

zožila spektralna črta. Po tem je sklepal, da je dosegel lasersko delovanje. Rubinski laser izkorišča prehode med tremi stanji.



Slika 2. Poenostavljena risba kaže zgradbo rubinskega laserja (levo): RR valjasta rubinska paličica, Z_1 zrcalo, Z_2 zrcalo prepušča majhen del vpadne svetlobe, KC ksenonova cevka v obliki vijačnice ovija rubinsko paličico, KB kondenzatorji, KS curek koherentne svetlobe. Risba kaže prehode med stanji v kristalu (desno): (1) prehod ob absorpciji svetlobe iz ksenonove cevke – optično črpanje – iz osnovnega stanja na širok energijski pas, (2) prehod brez sevanja v ostro stanje, (3) prehod ob stimuliranem sevanju v osnovno stanje. Narisana so stanja, pomembna za sevanje laserja pri valovni dolžini 694,3 nm. Razbrati je mogoče, da rubinski laser uporablja tri stanja.

Kratek opis poskusa z naslovom *Optično masersko delovanje v rubinu* je poslal reviji Physical Review Letters. Urednik je rokopis takoj zavrnil. Tik pred tem je Maiman namreč v tej reviji objavil članek o lastnostih rožnatega rubina. Najbrž se je urednik želel izogniti vrsti člankov o maserjih, ki bi se med seboj le malo razlikovali. Spregledal pa je pomembno odkritje. Na začetku julija je družba Hughes sklicala tiskovno konferenco, potem ko je londonska revija Nature skrajšani članek sprejela v objavo, a preden je izšel. Nekateri fiziki so podvomili o tem, da je zares šlo za lasersko delovanje. Maiman je daljši članek poslal reviji Journal of Applied Physics, a tudi s tem ni imel sreče. Nepooblaščen ga je objavila angleška revija, ki je do rokopisa prišla na tiskovni konferenci. Tako je moral rokopis umakniti.

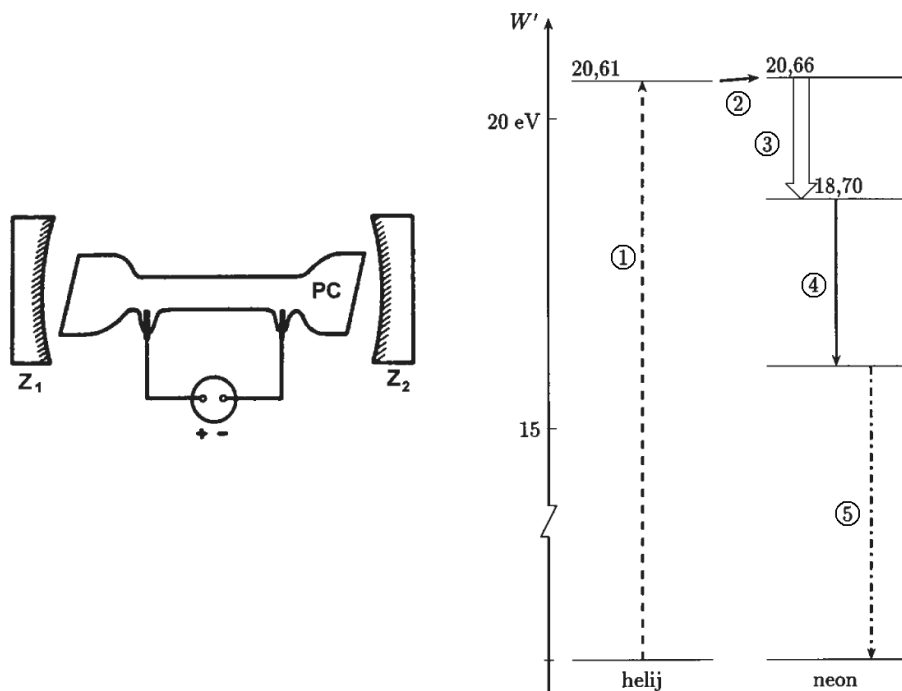
Na univerzi Columbia se naprava s kalijevo paro ni obnesla in so delo na njej ustavili. Tekme za laser se je udeležilo več laboratorijev industrijskih družb, med njimi tudi Bellovi laboratoriji. Nekaterim njihovim raziskovalcem se je Maimanovo poročilo zdelo pomanjkljivo. Pohiteli so in se prepričali o delovanju rubinskega laserja. Robert J. Collins, Donald F. Nelson,

Schawlow, Walter Bond, Geoffrey B. Garret in Wolfgang Kaiser so že konec avgusta dokončali poročilo o rubinskem laserju, ki je v *Physical Review Letters* izšlo oktobra. Opisali so zoženje laserskega curka, ki je na steni dal majhno rdečo piko. Maiman ni poročal o zoženju curka, ki je poleg močnega ojačenja in ozke spektralne črte značilno za lasersko delovanje. Menda je bil njegov prvi rubinov kristal razmeroma majhen in optično ni bil neoporečen. Z drugim kristalom v obliki paličke z dolžino okoli 10 cm pa je pozneje opazoval zožitev. Maiman tudi ni omenil, da se je v odvisnosti moči v sunku od časa pokazalo veliko ostrih zob. Sicer jih je opazil, a je mislil, da gre za posebnost merilne naprave. V Bellovih laboratorijih so ugotovili, da so to *relaksacijska nihanja*, ki so značilna za lasersko delovanje. Kaže, da sta Maiman in družba Hughes pohitela z objavo, da ju ne bi kdo prehitel. Nekaj časa je nad Maimanovim odkritjem ležala senca in med družbo Hughes in Bellovimi laboratoriji je prišlo do napetosti. Čez čas so se nasprotja polegla in so Maimanu priznali prvenstvo. Po petdesetih letih so poskusili razčistiti odnos Bellovih laboratorijev do Maimanovega odkritja in Maimanu dati dolžno priznanje [4]. Uredništvo *Physics Today* pa je po napaki v uvodu članka dodalo, „da je delo v Bellovih laboratorijih poleti 1960 vodilo k ustvaritvi prvega rubinskega laserja“. V pismih se je pet bralcev zavzelo za Maimana [6]. Eden od njih je zapisal, da je spoznal, „kako umazan je lahko napredek v fiziki“.

Helij-neonski laser

Drugo raziskovalno skupino v Bellovih laboratorijih je vodil Ali M. Javan, ki je doktoriral pri Townesu, nekaj časa sodeloval z njim, potem pa leta 1958 postal član laboratorijev. Javan je stavil na plinski laser. Po premisleku je izbral mešanico helija in neona in o tem poročal. Z njim sta sodelovala William R. Bennett in Donald R. Heriot. Kaže, da so si vzeli več časa, čeprav tudi pri njih ni šlo brez težav. Končni poskus so izvedli sredi decembra 1960. Steklene dele naprav so pred poskusom dlje časa segrevali, da so izgnali adsorbirane primesi. Pred poskusom so cev napolnili z mešanico helija in neona v določenem razmerju. Cev so priključili na enosmerno napetost in po plinu pognali tok. Dobili so zelo ozek rdeč laserski curek z zelo ozko spektralno črto, kar je pričalo o laserskem delovanju. To je bil prvi plinski laser in prvi laser z neprekinjenim delovanjem. Članek *Obrnjena zasedenost in neprekinjeno optično masersko nihanje v električnem toku po plinu, ki vsebuje mešanico helija in neona* je izšel februarja 1961, ko so tudi priredili tiskovno konferenco. Javan in Bennett sta ta laser patentirala.

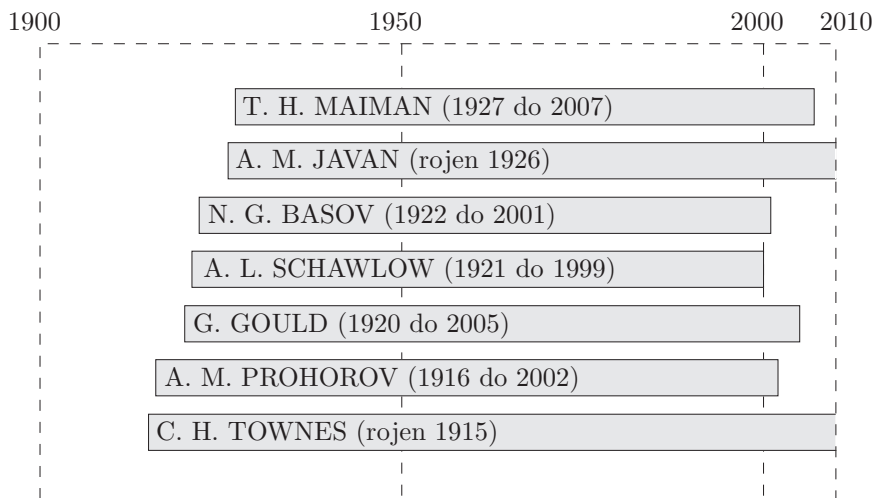
Helij-neonski laser izkorišča prehode med štirimi stanji. V cevi s preme-



Slika 3. Poenostavljena risba kaže zgradbo helij-neonskega laserja (levo): PC plinska cevka z mešanico helija in neona pri nizkem tlaku, Z_1 krogelno zrcalo, Z_2 krogelno zrcalo, ki prepušča majhen del vpadne svetlobe. Stranski steni sta nagnjeni pod Brewstrovim kotom. Risba kaže prehode med stanji (desno). Levi del zadeva stanje atoma helija, desni pa stanje atoma neona: (1) po trku z elektronom helijev atom preide v vzbujeno stanje, iz katerega ne more preiti s sevanjem, (2) pri trku z atomom helija atom neona preide v stanje z energijo okoli 20 eV, (3) prehod s stimuliranim sevanjem v stanje z manjšo energijo, (4) prehod s spontanym sevanjem v stanje s še manjšo energijo, (5) prehod v osnovno stanje ob trku atoma s steno posode. Narisana so stanja, pomembna za sevanje laserja pri valovni dolžini 632,8 nm. Razbrati je mogoče, da helij-neonski laser uporablja štiri stanja.

rom okoli centimetra in dolžino do metra je mešanica plinov pri tlaku okoli milibara. Navadno je sedem do desetkrat več neona kot helija. Pri trkih z elektroni nekateri atomi helija iz osnovnega stanja preidejo v vzbujeno stanje, iz katerega lahko preidejo le ob trkih. Pri trku atom neona prevzame energijo od atoma helija. Vlogo črpanja prevzamejo torej trki med atomi. Tako nastane obrnjena zasedenost med sosednjima stanjema atoma neona. Na začetku kak neonov atom spontano seva. Valovanje po plinu potuje sem in tja med krogelnima zrcaloma, ki sta zunaj cevi. Cev ima okenca, ki po Brewstrovem zakonu prepuščajo valovanje z jakostjo električnega polja v vpadni ravnini. Valovanje s pravo smerjo in polarizacijo povzroča stimuli-

rano sevanje drugih neonovih atomov in sevanje se ojačuje. Eno od zrcal prepušča majhen del valovanja.



Slika 4. „Tekme za laser“ se je udeležilo veliko raziskovalcev iz različnih družb in ustanov. Glavne navaja preglednica. Leta 1964 so „za temeljno delo v kvantni elektroniki, ki je pripeljalo do izdelave oscilatorjev in ojačevalnikov na osnovi masersko-laserskega načela“, dobili Nobelovo nagrado Townes (polovico) ter Basov in Prohorov (po četrtino), leta 1981 pa Schawlow in Nicolaas Bloembergen „za prispevek k razvoju laserske spektroskopije“.

Na prehodu med letoma 1960 in 1961 je delovalo že pet vrst laserjev. Kmalu se je število različnih vrst laserjev še povečalo. Leta 1962 so izdelali prvi polprevodniški laser. Ti laserji ali laserske diode so v naslednjih letih doživeli hiter razvoj in jih danes v vsakdanjem življenju največ uporabljamo v zapisovalnikih in čitalnikih plošč DVD in CD, laserskih tiskalnikih, mikrofoni in kazalnikih, merilnikih razdalj ter čitalnikih črtne kode pri blagajnah trgovin.

LITERATURA

- [1] M. Čopič, *Zakaj je laserski curek ozek in enobarven?*, Obozrnik mat. fiz. **36** (1989) 1, str. 13–23.
- [2] S. Poberaj, *Maserji*, Obzornik mat. fiz. **7** (1960) 3, str. 108–115.
- [3] J. L. Bromberg, *The Birth of the Laser*, Phys. Today **41** (1988) 10, str. 26–33.
- [4] D. F. Nelson, R. J. Collins in W. Kaiser, *Bell Labs and the ruby laser*, Phys. Today **63** (2010) 1, str. 40–45; in drugi članki v posebni številki Physics Today.
- [5] S. Perkowitz, *From ray-gun to Blu-ray*, Phys. World **23** (2010) 5, str. 16–20; in drugi članki v posebni številki Physics World.
- [6] J. Hecht, R. F. Wuerker, I. D. Abella, V. Evtuhov in D. Langenberg, *More light on ruby laser's history*, Phys. Today **63** (2010) 5, str. 8–10.