

I 50 ANNI DEL LASER

storia d'un connubio fra scienza e tecnologia

di Sergio Musazzi*

Era il 1960 quando Theodor Maiman dei Laboratori di Ricerca della Hughes Corporation (USA) riuscì a realizzare il primo laser sfruttando l'emissione luminosa di un cilindro di rubino posto fra due specchi. Da allora il numero di sorgenti laser è andato sempre più crescendo, diversificandosi sia per la tecnologia utilizzata per la costruzione dei dispositivi sia per la regione spettrale in cui si riesce a ottenere l'emissione di luce coerente. Attualmente l'insieme dei laser utilizzati nelle diverse applicazioni è in grado di coprire quasi completamente l'intera regione spettrale che si estende dalla banda dei terahertz (in cui operano i laser a cascata quantica) a quella dei raggi X (ottenibili grazie ai laser a elettroni liberi).

*Ricercatore presso il T&D Technologies Department - RSE SpA.

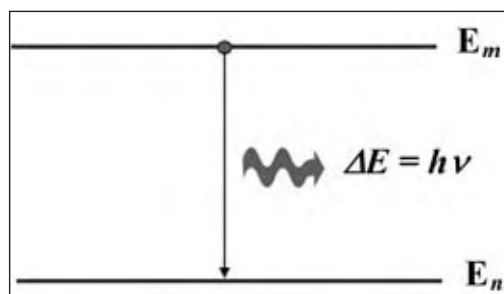
La storia del laser è un esempio impressionante di come scienza e tecnologia siano riuscite a integrarsi e a evolvere l'una grazie all'altra. Da quella che era considerata una pura speculazione teorica si è riusciti a progettare e a realizzare una nuova sorgente di radiazione che a sua volta ha consentito di dar vita a nuove ricerche scientifiche che, come risultato, hanno portato alla esplorazione di fenomeni naturali di cui prima si ignorava addirittura l'esistenza. Nel corso di questo processo hanno visto la luce diverse applicazioni pratiche, ognuna delle quali è divenuta foriera di ulteriori ricerche in una sorta di reazione a catena che dimostra come ricerca scientifica e tecnologia siano indissolubilmente legate e necessitino l'una del contributo dell'altra.

Prendendo spunto dalla ricorrenza del cinquantesimo anniversario della realizzazione del primo laser a opera di Theodor Maiman, questo articolo ripercorre le principali tappe di quello straordinario processo scientifico-tecnologico che, partendo dalle speculazioni teoriche di Albert Einstein, ha portato alla realizzazione dei primi rudimentali esemplari di sorgente di radiazione coerente, capostipiti di tutti quei dispositivi che noi oggi utilizziamo tanto nella vita quotidiana (basti pensare ai comuni lettori di compact disk o ai lettori di codici a barre nei supermercati) quanto nelle più complesse e sofisticate applicazioni scientifiche e tecnologiche.

Da dove nasce l'idea

Il funzionamento dei laser e dei loro progenitori, i maser, sfrutta tre fenomeni fondamentali che avvengono nell'interazione di un'onda elettromagnetica (e.m.) con gli atomi e le molecole di un materiale. Si tratta dei fenomeni di assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata. Questi tre fenomeni furono trattati in maniera esaustiva in un famoso articolo di Einstein del 1916. L'ipotesi di partenza dell'articolo era la natura quantistica dei sistemi atomici, vale a dire il fatto che ogni atomo/molecola può assumere solo stati fisici discreti corrispondenti ad altrettanti valori discreti di energia. Va tuttavia precisato che non sempre questi livelli energetici sono così ben definiti. Nei solidi e nei liquidi, per esempio, più che di livelli si tratta di zone o bande di energia possibili per gli elettroni (si pensi alle note bande di valenza e di conduzione di un semiconduttore). Per comprendere cosa accade quando un'onda e.m. interagisce con un sistema atomico o molecolare consideriamo un sistema molto semplice costituito da due soli livelli energetici E_n ed E_m con E_n minore di E_m . I due livelli potrebbero essere due qualsiasi di un elettrone dell'atomo o molecola in esame.

Supponiamo che inizialmente l'elettrone si trovi sul livello E_m . Poiché E_m è maggiore di E_n l'elettrone si trova in uno stato di equilibrio instabile e tende a portarsi sul livello a energia più bassa E_n .



Emissione spontanea

L'emissione spontanea

Quando ciò accade, l'elettrone cede la differenza di energia fra i due livelli ($E_m - E_n$) sotto forma di un'onda e.m. di frequenza ν data da:

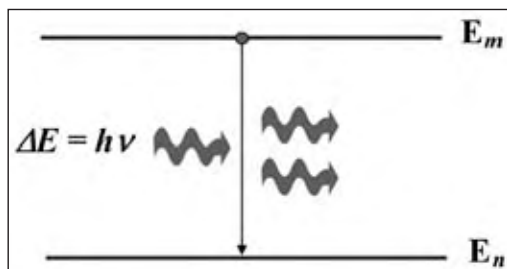
$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} \quad (1)$$

dove h è la costante di Planck. Questo fenomeno prende il nome di «emissione spontanea». Per definire la probabilità che questo fenomeno accada occorre considerare il numero di atomi/molecole N_m che al tempo t hanno energia E_m . Il numero di atomi/molecole che nell'unità di tempo passerà dal livello m al livello n sarà:

$$\frac{dN_m}{dt} = -A_{mn} N_m \quad (2)$$

dove A_{mn} è una costante (detta coefficiente di emissione spontanea) che dipende dal materiale considerato, mentre il suo inverso $\tau = 1/A_{mn}$ rappresenta la vita media di emissione spontanea, vale a dire il tempo medio di permanenza di un elettrone sul livello energetico N_m .

L'emissione stimolata



Emissione stimolata

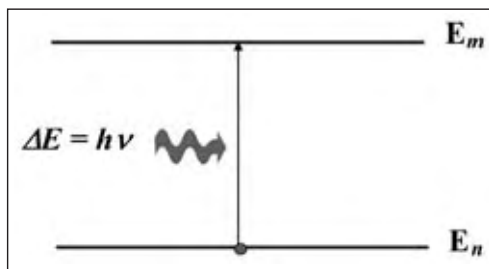
Consideriamo nuovamente il nostro sistema a due livelli con l'elettrone che si trova sul livello più alto E_m . Supponiamo ora che tale sistema sia investito da un'onda e.m. di frequenza ν data dalla (1), cioè della stessa frequenza che l'atomo/molecola emetterebbe per emissione spontanea. In questo caso può avvenire che, al momento dell'interazione con l'onda, l'elettrone sia forzato a portarsi sul livello più basso E_n emettendo a sua volta un'onda e.m. della stessa frequenza ν di quella incidente.

È questo il fenomeno dell'emissione stimolata. È importante notare che a differenza dell'emissione spontanea, dove l'onda e.m. viene emessa in un istante casuale, in questo caso l'emissione avviene nello stesso istante in cui l'onda forzante interagisce con l'atomo/molecola. Ne consegue che l'onda emessa si somma in fase con la forzante e propaga nella stessa direzione. In analogia con la (2), indicando con N_m il numero di atomi/molecole che al tempo t ha energia E_m , la probabilità di emissione stimolata è data da:

$$\frac{dN_m}{dt} = -B_{mn} N_m \quad (3)$$

dove B_{mn} è una costante (detta coefficiente di emissione stimolata) che dipende sia dalle caratteristiche del materiale sia dall'intensità I dell'onda forzante.

Come ultimo caso consideriamo quello in cui l'elettrone occupa il livello energetico più basso E_n . Si tratta di una situazione di stabilità in quanto, trovandosi sul livello più basso, in assenza di stimoli esterni l'elettrone tenderà a rimanere su quel livello. Supponiamo ora che l'atomo/molecola sia investito da un'onda e.m. di frequenza ν data dalla (1). In questo caso può accadere che l'onda e.m. incidente ceda la propria energia all'elettrone, stimolandolo in questo modo a portarsi sul livello energetico più alto E_m .



Assorbimento

In analogia con la (3) la probabilità di assorbimento si

ricava dalla relazione:

$$\frac{dN_m}{dt} = -B_{mn} N_m \quad (4)$$

dove B_{mn} è una costante (detta coefficiente di assorbimento) che, come nel caso dell'emissione stimolata, dipende solo dalle caratteristiche del materiale e dall'intensità I dell'onda forzante.

Come Einstein ha dimostrato, per uno stesso materiale, a parità dell'intensità I dell'onda e.m. incidente,

$$B_{mn} = B_{nm}$$

cioè, la probabilità di emissione stimolata e di assorbimento sono uguali.

Un amplificatore di luce

Risulta evidente, da quanto abbiamo detto fino a ora, che il comportamento di un materiale investito da un'onda e.m. di frequenza ν data dalla (1) dipende esclusivamente dal numero di atomi/molecole (per unità di volume) che si trovano rispettivamente sui livelli n e m . Infatti, se il numero di atomi/molecole che stanno sul livello fondamentale è maggiore di quello che si trova sul livello eccitato (vale a dire $N_n > N_m$) saremo in presenza di un assorbitore in quanto il fenomeno dell'assorbimento prevarrà su quello dell'emissione stimolata. Viceversa, se il numero di atomi/molecole sul livello fondamentale è inferiore a quello sul livello eccitato (vale a dire $N_m > N_n$) il materiale si comporterà da amplificatore poiché il fenomeno di emissione stimolata prevarrà su quello di assorbimento. Sembrerebbe quindi possibile, almeno in linea di principio, realizzare un amplificatore di luce portando il materiale in uno stato per cui il numero di atomi/molecole sul livello eccitato risulti superiore al numero di atomi/molecole che si trovano sul livello fondamentale.

Per quanto affascinante, questa idea fu guardata con molto scetticismo dai contemporanei di Einstein in quanto un insieme di atomi/molecole, nella maggior parte dei casi, si trova praticamente tutto nello stato fondamentale e quindi il fenomeno dell'assorbimento è di gran lunga più probabile di quello dell'emissione stimolata. Come è ben noto, infatti, all'equilibrio termodinamico tutti i materiali si comportano come assorbitori di radiazione. Affinché il fenomeno di emissione stimolata diventi predominante, è indispensabile creare nel materiale una situazione di non equilibrio per cui risulti $N_m > N_n$. Quando si verifica questa condizione si dice che nel materiale si è prodotta una «inversione di popolazione» in quanto la condizione $N_m > N_n$ è l'inverso di quella presente all'equilibrio termodinamico. Il materiale in cui è presente una inversione di popolazione viene chiamato «mezzo attivo».

E venne il maser

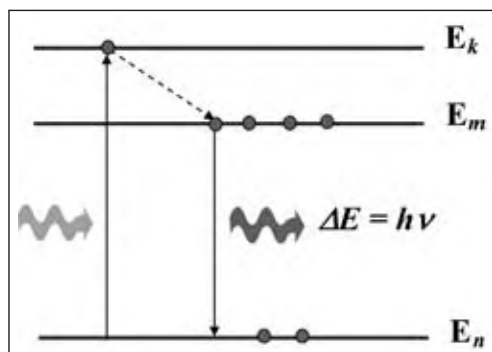
Nel 1954 gli americani Charles Townes, James Gordon e Herbert Zeiger della Columbia University di New York e, indipendentemente, i russi Nikolay Basov e Aleksandr Prokhorov del Lebedev Institute di Mosca, riuscirono a realizzare i primi amplificatori per microonde basati sul principio di emissione stimolata, chiamati *maser* (un acronimo che sta per *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Il mezzo attivo in cui i due gruppi di ricerca riuscirono a creare l'inversione di popolazione fu l'ammoniaca. Le molecole di questa sostanza nello stato eccitato venivano estratte per via elettrostatica da un fascio molecolare e accumulate in una cavità risonante accordata sulla frequenza della transizione fra lo stato eccitato e quello fondamentale ($\nu = 24$ GHz). Nell'istante in cui, per emissione spontanea, una molecola di ammoniaca si diseccitava, veniva emessa una radiazione a 24 GHz che per

emissione stimolata provocava la diseccitazione delle molecole vicine in un processo a valanga che in brevissimo tempo portava alla diseccitazione globale del mezzo attivo con l'emissione di un intenso lampo di radiazione monocromatica. Poiché i fotoni, a causa del processo di emissione stimolata, sono in fase fra di loro, la radiazione emessa oltre che monocromatica era anche coerente temporalmente. Per queste ricerche, nel 1964 Basov, Prokhorov e Townes ricevettero il premio Nobel per la Fisica.

Come descritto, i primi maser erano in grado di generare solo brevi impulsi di radiazione coerente. Per poter ottenere una emissione continua era necessario trovare un meccanismo che consentisse di mantenere nel tempo l'inversione di popolazione nel mezzo attivo. Tale meccanismo fu proposto

nel 1956 da Nicolaas Bloembergen, docente di fisica alla Harvard University, e si basava sull'idea di utilizzare tre o più livelli energetici del materiale in esame.

Come mostrato nell'immagine a lato, è necessario portare (mediante un opportuno meccanismo di eccitazione) gli atomi/molecole dal livello n al livello k (operazione chiamata di «pompaggio»). Se il livello k è scelto in modo tale che gli elettroni decadano rapidamente sul livello m mediante processi non radiativi - la differenza di energia fra i livelli k e m in questo caso viene dissipata termicamente - si riesce a ottenere un'inversione di popolazione fra i livelli m e n .



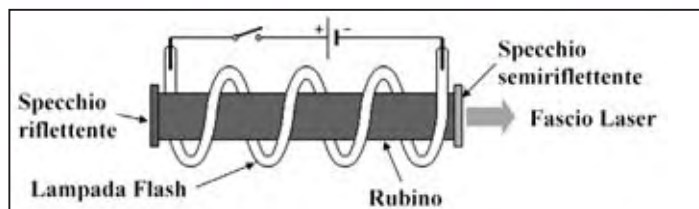
Inversione di popolazione mediante pompaggio ottico

L'idea di Bloembergen venne adeguatamente sfruttata da G. Makov, C. Kikuchi, J. Lambe e R.W. Terhune dell'Università del Michigan che realizzarono un maser a stato solido in grado di produrre una radiazione continua. Il meccanismo di pompaggio sfruttava gli stati di *spin* elettronico del cromo, presente come impurità nel rubino. Poiché l'energia degli stati di *spin* del cromo può essere modificata mediante l'applicazione di un campo magnetico, la radiazione prodotta da questa sorgente può essere regolata in frequenza. Questa caratteristica, unitamente all'alto guadagno e al basso rumore, resero questa sorgente maser uno strumento particolarmente utile per applicazioni nella radio-astronomia.

Finalmente il laser

La prima idea di un laser, vale a dire di un maser in grado di operare nella regione ottica dello spettro elettromagnetico (la parola laser è infatti un acronimo simile a maser, dove il termine *Microwave* è sostituito con *Light*) fu pubblicata nel 1958 sulla rivista americana *Physical Review* in un articolo a firma di Townes e Schawlow. La costruzione di un laser funzionante, tuttavia, non fu immediata. Occorreva trovare un adeguato materiale da eccitare, inoltre, la minor lunghezza d'onda della radiazione richiedeva una maggiore

stabilità e apparati di misura molto più precisi. Fu solo nel 1960 che Theodor Maiman dei Laboratori di Ricerca della Hughes Corporation (USA) riuscì a realizzare il primo laser. Si trattava di un laser impulsato ottenuto sfruttando un cilindro di rubino posto fra due specchi. Il pompaggio era di tipo ottico e veniva realizzato mediante un intenso flash luminoso generato con una lampada a scarica di forma elicoidale posta attorno alla barra di rubino.



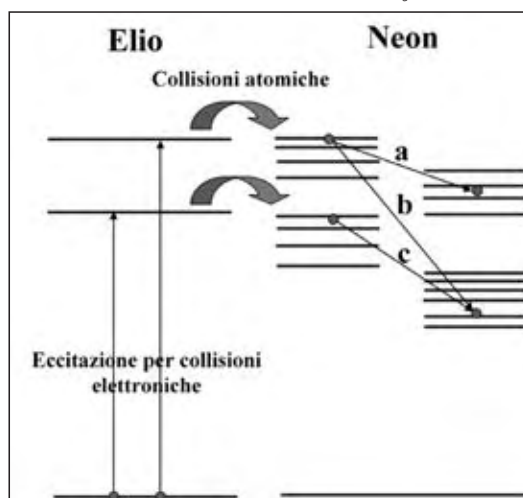
Struttura di un laser a rubino

Come nei primi maser, la diseccitazione per emissione spontanea di un fotone innescava il processo di emissione stimolata e la conseguente generazione di un impulso luminoso ulteriormente amplificato dalla risonanza ottica fra i due specchi. In pratica, l'onda e.m. alla frequenza ν , generata per emissione stimolata, propagava avanti e indietro fra i due specchi (perpendicolarmente alla loro superficie) amplificandosi a ogni passaggio nel mezzo attivo. Poiché uno dei due specchi era parzialmente riflettente, da esso usciva il fascio utile. Naturalmente l'oscillazione durava fintanto che il guadagno per il passaggio nel mezzo attivo compensava le perdite per passaggio (quali per esempio quelle causate dallo specchio semiriflettente).

Il primo laser in grado di produrre una emissione continua di luce (anziché singoli impulsi) fu realizzato verso la fine del 1960 da Ali Javan, William Bennet e Donald Herriot. I tre ricercatori dei Laboratori Bell (USA) realizzarono un dispositivo che sfruttava come mezzo attivo una miscela di due gas nobili: l'Elio e il Neon (per questo motivo il laser prese il nome di laser HeNe). Anche il funzionamento era radicalmente diverso dal dispositivo precedentemente sviluppato da Maiman. L'eccitazione del mezzo attivo, infatti, era realizzata mediante una scarica elettrica (anziché un lampo luminoso) e sfruttava un processo detto «trasferimento risonante di eccitazione» basato sul trasferimento di energia mediante urti fra molecole di tipo diverso. Nel laser HeNe, infatti, l'azione laser è prodotta fra i livelli energetici del Neon mentre l'Elio è introdotto ad arte per facilitare il meccanismo di pompaggio.

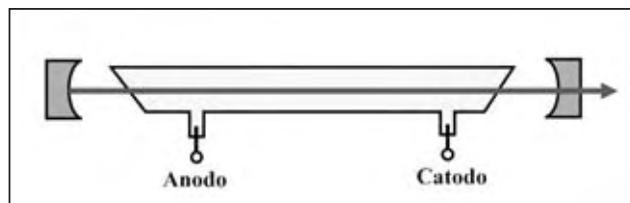
Come mostrato nell'immagine a lato, la scarica elettrica popola due livelli eccitati dell'Elio e successivamente, per urto fra le molecole dei due gas, l'energia viene trasferita al Neon popolandolo due suoi livelli metastabili (dove gli elettroni permangono per un tempo sufficientemente lungo). Questi livelli, infine, sono soggetti al fenomeno di diseccitazione per emissione stimolata e conseguentemente generano un'emissione di radiazione coerente mediante decadimento su altri due livelli di energia inferiore. Le tre possibili transizioni mostrate consentono

Schema dei livelli energetici del laser HeNe



di generare radiazioni di lunghezza d'onda rispettivamente $\lambda_1 = 3,39 \mu\text{m}$ (transizione a), $\lambda_2 = 0,6328 \mu\text{m}$ (transizione b) e $\lambda_3 = 1,15 \mu\text{m}$ (transizione c). Il laser realizzato da Javan, Bennet e Herriot sfruttava la transizione a 1,15

μm . Successivamente, i laser HeNe commerciali utilizzarono l'emissione nel visibile a $0,6328 \mu\text{m}$ ottenuta per la prima volta nel 1962 da Alan White e Dane Rigden, anch'essi dei Laboratori Bell. Anche nel laser HeNe la cavità risonante è ottenuta con l'ausilio di due specchi.



Struttura del laser HeNe

È da notare, inoltre, che le finestre di chiusura del tubo di vetro contenente i gas vengono inclinate all'angolo di Brewster in modo tale da consentire la propagazione nella cavità risonante di una sola direzione di polarizzazione della luce. Con questo espediente si è riusciti a ottenere sorgenti laser in grado di emettere luce non solo coerente ma anche polarizzata linearmente.

Gli sviluppi successivi

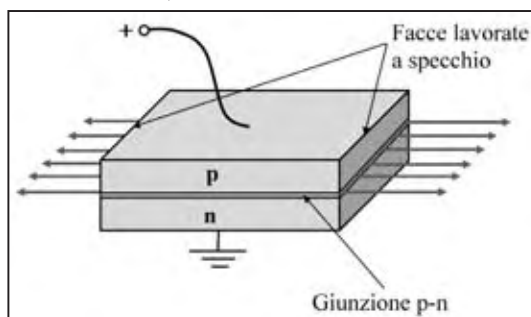
I laser HeNe ebbero una vastissima diffusione. Vennero utilizzati oltre che per scopi scientifici (soprattutto nel campo della metrologia in applicazioni di interferometria, olografia e tecniche *speckle*) anche in applicazioni commerciali (basti pensare ai lettori di codici a barre) e militari (in particolare nei sistemi di puntamento). Il loro limite era rappresentato soprattutto dalla bassa potenza della radiazione emessa (alcune decine di milliwatt al massimo). Per superare questa limitazione, nel 1964 Kumar Patel degli *AT&T Bell Labs* realizzò il primo laser a CO_2 che, per la tecnologia con cui era realizzato, consentiva di generare potenze molto maggiori. A partire da questo primo prototipo, vennero successivamente sviluppate sorgenti con prestazioni sempre più elevate fino a raggiungere potenze dell'ordine di alcune decine di kilowatt. Attualmente i laser a CO_2 vengono utilizzati per lavorazioni meccaniche quali taglio, saldatura, trattamenti superficiali, eccetera.

Sempre nel 1964 W.E. Bell della *Spectra Physics* riuscì a ottenere l'azione laser sfruttando una miscela di elio e ioni di mercurio, aprendo in questo modo la strada per lo sviluppo dei cosiddetti laser «a ioni» (da cui poi ebbero origine i laser «a vapori metallici»).

Un significativo passo in avanti verso la miniaturizzazione delle sorgenti laser venne compiuto con la realizzazione dei primi dispositivi a semiconduttore. Nel 1962 ben quattro gruppi di ricerca americani guidati rispettivamente da Marshal Nathan (*IBM Research Laboratory*), Robert H. Hall (*General Electric R&D Center*), Nick Holonyak (*General Electric - Syracuse*) e Robert H. Rediker (*MIT Lincoln Labs.*) presentarono un progetto di «Diodo Laser». L'idea su cui si basavano questi dispositivi era quella di generare un'inversione di popolazione

fra la banda di valenza e quella di conduzione presenti nei materiali semiconduttori. Com'è noto, in condizioni normali gli elettroni del mezzo occupano la banda di valenza, mentre la banda di conduzione è praticamente vuota. Applicando un campo elettrico, tuttavia, è possibile innescare la produzione di coppie elettrone-lacuna con conseguente popolamento della banda di conduzione e contemporaneo svuotamento della banda di valenza, il che rappresenta proprio un'inversione di popolazione. Quando alcuni elettroni ricadono spontaneamente nella banda di valenza per ricombinarsi con delle lacune, emettono fotoni di energia pari alla differenza di energia fra le due bande. Tale radiazione innesca il processo di emissione stimolata e la conseguente generazione di luce coerente.

I primi diodi laser erano estremamente delicati ed emettevano esclusivamente nell'infrarosso. Attualmente i diodi laser sono molto diffusi (trovano applicazioni in numerosi dispositivi elettronici) e sono ormai in grado di coprire l'intera regione del visibile.



Struttura di un diodo laser

E domani?

La tecnologia dei laser è ormai ben consolidata e la ricerca in questo settore è orientata principalmente verso lo sviluppo di sorgenti finalizzate ad applicazioni sempre più sofisticate.

Ne sono un chiaro esempio la realizzazione di nuovi laser a semiconduttore utilizzati per la cura dei tumori mediante l'innovativa terapia fotodinamica (in grado di sostituire i più invasivi trattamenti chemioterapici), oppure le ricerche riguardanti lo sviluppo di diodi laser di elevata potenza per la realizzazione di videoproiettori sempre più compatti (con l'obiettivo finale di integrarli nei nostri cellulari).

Altri interessanti esempi di settori di ricerca particolarmente innovativi riguardano lo sviluppo di laser ultraveloci (in grado cioè di generare impulsi al femtosecondo o addirittura all'attosecondo), da usare sia per la produzione di nano-materiali che per applicazioni di diagnostica clinica, o lo spettacolare utilizzo dei laser di potenza per l'innescò della fusione nucleare mediante confinamento inerziale (nell'esperimento in corso alla *National Ignition Facility* ne vengono utilizzati ben 192 contemporaneamente).

Gli esempi potrebbero continuare con riferimento a numerosi altri settori scientifici e tecnologici (che per ragioni di spazio non possiamo ricordare) a dimostrazione del fatto che nonostante i suoi cinquanta anni il laser non sia affatto un dispositivo obsoleto, ma rappresenti tuttora uno strumento scientifico di grande interesse con ampie prospettive di sviluppo anche negli anni futuri. ❖