

Lo sviluppo del LASER da Einstein ai semiconduttori

Tito Dal Canton ~ 490737

24 giugno 2005

Corso di Storia della Fisica, a.a. 2004-2005

Prof. G. Peruzzi

Università degli Studi di Padova

© 2005 Tito Dal Canton ~ <http://www.dalcanton.it/tito>

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.5 License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/> or send a letter to Creative Commons, 559 Nathan Abbott Way, Stanford, California 94305, USA.

a Serena

Questo testo vuole presentare la scoperta del fenomeno dell'emissione stimolata di radiazione e gli sviluppi scientifico-tecnologici che ne sono derivati, fino ad arrivare alle moderne sorgenti LASER. L'argomento è stato scelto essenzialmente per due motivi.

Il primo è il personale interesse verso l'interazione della radiazione con la materia e verso la tecnologia LASER, che considero una delle più utili ed eleganti applicazioni della fisica mai realizzate. Sfruttando una serie di leggi fisiche siamo riusciti a concentrare l'energia in una sottilissima banda di lunghezze d'onda, ottenendo radiazione dalle proprietà più auspicabili: intensa, monocromatica, coerente e polarizzata.

In secondo luogo, la storia del LASER è un esempio perfetto di come scienza e tecnologia riescano a scambiarsi conoscenza ed evolvere l'una grazie all'altra: da una pura previsione teorica guardata peraltro con scetticismo e da ricerche a scopi militari si giunge a progettare una nuova sorgente di radiazione, che a sua volta apre la strada a nuove ricerche scientifiche permettendo di esplorare fenomeni naturali di cui, prima, nemmeno si sospettava l'esistenza. Durante questo processo vengono ideate e realizzate svariate applicazioni pratiche, ognuna delle quali dà inizio ad un processo analogo, in una sorta di evoluzione ad albero. Un tale esempio mostra chiaramente come ricerca scientifica e tecnologia siano indissolubilmente legate, e nessuna possa avanzare senza il contributo dell'altra.

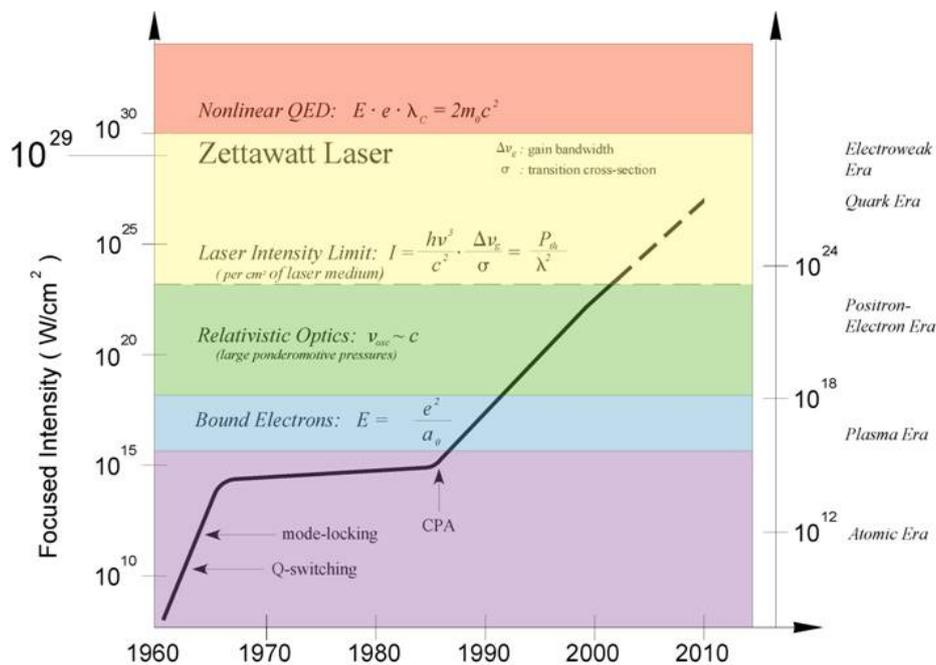


Figura 1: Intensità delle sorgenti LASER negli anni

Un nuovo fenomeno

Il ragionamento con cui Max Planck risolse il celebre problema del corpo nero ebbe un successo formidabile: la formula che aveva ricavato riusciva a spiegare la grande quantità di dati sperimentali disponibile, e ammetteva come caso limite la precedente legge di Wien, ricavata con considerazioni classiche e perciò incompleta. Tuttavia, Einstein non era soddisfatto di un particolare punto del ragionamento di Planck. In base a considerazioni meccanico-elettromagnetiche, Planck derivava una relazione tra la densità di radiazione ρ e l'energia E di un risonatore immerso in tale radiazione; nella sua teoria, un *risonatore* è un elemento discreto del corpo con cui la radiazione interagisce. Tale relazione è

$$E = \frac{c^3 \rho}{8\pi\nu^2}.$$

Come Einstein sottolineò, essa non teneva conto dei principi della nascente teoria quantistica; perciò egli propose, in un noto articolo del 1916, di sostituire il ragionamento di carattere meccanico-elettromagnetico alla base di tale relazione con considerazioni più generali e puramente quantistiche sull'interazione tra radiazione e materia.

La sua trattazione è derivata da tre soli presupposti:

- La materia immersa nella radiazione è composta da molecole (che identifichiamo nei risonatori di Planck); ogni molecola può assumere solo stati fisici discreti, corrispondenti ad altrettanti valori discreti di energia.
- Ogni molecola può passare da uno stato fisico ad un altro emettendo o assorbendo radiazione elettromagnetica di energia pari al salto energetico tra i due stati.
- La densità della radiazione ρ cresce indefinitamente al crescere della temperatura dell'insieme di molecole (assunzione più che altro “pratica”, ragionevole e meno fondamentale delle precedenti).

In queste ipotesi immaginiamo un insieme statistico di molecole immerse in radiazione, e consideriamo due stati di una molecola n ed m con energie $E_n < E_m$. Chiamiamo inoltre N_i il numero di molecole nello stato i . L'emissione di radiazione da parte di una molecola corrisponde ad una perdita di energia, quindi alla transizione $m \rightarrow n$, e avviene senza cause esterne (è *Ausstrahlung*, emissione spontanea); il rate di tali transizioni sarà $A_{m \rightarrow n} N_m$, dove $A_{m \rightarrow n}$ è una costante caratteristica della molecola che dipende solo dalla sua struttura. D'altra parte, l'incidenza di radiazione può causare sia un aumento di energia della molecola (transizione $n \rightarrow m$) che una diminuzione (transizione $m \rightarrow n$), a seconda della differenza di fase tra radiazione e risonatore. Il rate di transizioni $n \rightarrow m$ sarà $B_{n \rightarrow m} N_n \rho$, quello di transizioni $m \rightarrow n$ sarà $B_{m \rightarrow n} N_m \rho$. Anche ora $B_{n \rightarrow m}$ e $B_{m \rightarrow n}$ sono costanti che dipendono solo dalla struttura della molecola. Va notato che stavolta i rate dipendono da ρ , la densità della radiazione. Detto questo, se c'è equilibrio termodinamico tra radiazione e molecole deve esserci anche equilibrio statistico sulla popolazione dei vari stati, in particolare il rate di transizione dallo stato n allo stato m deve essere uguale al rate di transizione opposta. Quindi deve valere la relazione

$$A_{m \rightarrow n} N_m + B_{m \rightarrow n} N_m \rho = B_{n \rightarrow m} N_n \rho.$$

Dal principio di Boltzmann o da equivalenti considerazioni termodinamiche si ricava poi la probabilità del generico stato i ; è la famosa legge esponenziale

$$W_i = \frac{N_i}{N} = p_i e^{-E_i/kT}.$$

Unendo le due equazioni e tenendo conto del terzo postulato, si giunge proprio alla formula del corpo nero di Planck (con alcune costanti indeterminate)

$$\varrho = \frac{A_{m \rightarrow n} B_{m \rightarrow n}}{e^{(E_m - E_n)/kT} - 1};$$

infine, chiedendo che come limite valga la legge di Wien si ricava addirittura la relazione energia-frequenza

$$E_m - E_n = \Delta E \propto \nu.$$

Con tre postulati molto generali sull'interazione tra radiazione elettromagnetica e materia Einstein fu quindi in grado di ricavare la formula del corpo nero (problema che aveva assillato non poco i fisici!) e la fondamentale relazione tra energia e frequenza della radiazione. Ma il suo lavoro mise anche in luce un fenomeno nuovo, centrale ai fini di questo testo: oltre ad essere assorbita da una molecola diseccitata, la radiazione può stimolare una molecola già eccitata a diseccitarsi, restituendo l'energia al campo elettromagnetico tramite nuova radiazione. Dato che l'energia in gioco è la stessa, la radiazione emessa deve avere la stessa frequenza di quella stimolante.

L'idea che un tale fenomeno di *transizione stimolata* potesse manifestarsi macroscopicamente fu inizialmente considerata con scetticismo; l'interazione di radiazione con un atomo già eccitato doveva certamente essere un evento rarissimo. Non è errato pensare in questi termini, per la ragione seguente. Un insieme di molecole in condizioni "normali" si trova, nella maggioranza dei casi, praticamente tutto nello stato fondamentale. Secondo il ragionamento di Einstein, la probabilità di transizione stimolata cresce con il numero di molecole eccitate mentre quella di assorbimento è proporzionale al numero di molecole nello stato fondamentale; quindi l'assorbimento è di gran lunga più probabile dell'emissione stimolata, che di fatto non è macroscopicamente apprezzabile.

Mentre si scatenavano le guerre mondiali, l'emissione stimolata di radiazione rimase perciò una previsione teorica.

La ricerca nel campo delle microonde

Con il vasto impiego del radar nella seconda guerra mondiale, crebbe l'interesse verso la banda elettromagnetica delle microonde. Terminato il conflitto, chi aveva sviluppato la tecnologia radar continuò le ricerche in tale ambito, spesso usando proprio apparati militari. In particolare, molti ricercatori erano interessati alla spettroscopia a microonde, nata nel '34 con Cleeton e Williams che avevano studiato alcune particolari bande rotazionali della molecola di ammoniaca, la cui separazione energetica cadeva proprio nella regione delle microonde. La sorgente di radiazione principalmente impiegata era il *magnetron*, un particolare tubo a vuoto che consentiva di produrre microonde monocromatiche di lunghezza d'onda intorno al centimetro con potenze elevate (dispositivo in uso anche oggi, ad esempio nei forni a microonde).

Verso la fine del '50, però, la ricerca in tale campo iniziò ad affievolirsi: praticamente erano state studiate tutte le molecole semplici che interagissero con le microonde allora disponibili. La ricerca poteva continuare solo con una nuova sorgente, che generasse radiazione monocromatica a frequenza maggiore; sarebbe stato allora possibile studiare la struttura di livelli più energetici. Lo sviluppo di una nuova sorgente avvenne in due fasi, e vide nuovamente protagonista la molecola di ammoniaca.

La prima fase fu la costruzione del cosiddetto *ammonia clock*. Nel 1952 Lyons, del Central Radio Propagation Laboratory di Washington, espone l'idea di un oscillatore che usava un picco di assorbimento rotazionale della molecola di ammoniaca come riferimento in frequenza, ottenendo una stabilità senza precedenti.

Il secondo passo si ebbe nel '53 con Weber, Università del Maryland, che presentò una strategia per ottenere amplificazione di radiazione tramite il fenomeno dell'emissione stimolata. Partendo dai risultati di Einstein, Weber calcolò le performance di un amplificatore di questo tipo basato ancora una volta sull'ammoniaca: la potenza ottenibile risultò intorno ai 2 mW per 100 cm³ di gas. Fondamentale ai fini del processo era la preparazione del mezzo in modo che si trovasse fuori dall'equilibrio termodinamico; solo in questo modo sarebbe stato possibile rendere non trascurabile la probabilità di emissione stimolata rispetto a quella di assorbimento.

Maser

Già nel 1954 Townes, Gordon e Zeiger (Columbia University, New York), e indipendentemente Basov e Prokhorov (Lebedev Institute, Mosca), riuscirono a realizzare i primi amplificatori per microonde basati sul processo di emissione stimolata, che furono chiamati MASER (Microwave Amplification with Stimulated Emission of Radiation). Ciò che permise ai gruppi di far prevalere l'emissione stimolata sull'assorbimento fu—come aveva suggerito Weber—la cosiddetta *inversione di popolazione*, cioè la preparazione delle molecole in modo che siano praticamente tutte in uno stato eccitato anziché in quello fondamentale. La sostanza utilizzata fu ancora l'ammoniaca: le poche molecole eccitate venivano estratte elettrostaticamente da un fascio molecolare e accumulate all'interno di una cavità risonante, accordata sulla frequenza della transizione verso lo stato fondamentale (24 GHz). In questo modo, una diseccitazione spontanea emetteva radiazione che provocava la diseccitazione stimolata delle molecole vicine, innescando un processo a valanga che portava in brevissimo tempo alla diseccitazione globale del mezzo, con l'emissione di un intenso lampo di microonde praticamente monocromatiche. Particolarità della radiazione prodotta era la *coerenza*: infatti il processo di emissione stimolata garantisce una relazione ben definita tra la fase della luce stimolante e quella emessa (i fotoni sono esattamente in fase). Dopo la diseccitazione l'ammoniaca si trovava per definizione nello stato fondamentale; cessava quindi la condizione indispensabile per avere l'emissione stimolata. In questo modo non era possibile ottenere radiazione continua, ma solo impulsi. Per queste ricerche Basov, Prokhorov e Townes ricevettero il Nobel per la Fisica nel 1964.

Naturalmente era auspicabile un'emissione continua di microonde: serviva un sistema in grado di mantenere nel tempo l'inversione di popolazione, cioè un mezzo con molti livelli eccitati accessibili e un meccanismo che li ripopolasse in continuazione. Furono Makov, Kikuchi, Lambe e Terhune a presentare un MASER a stato solido che generava

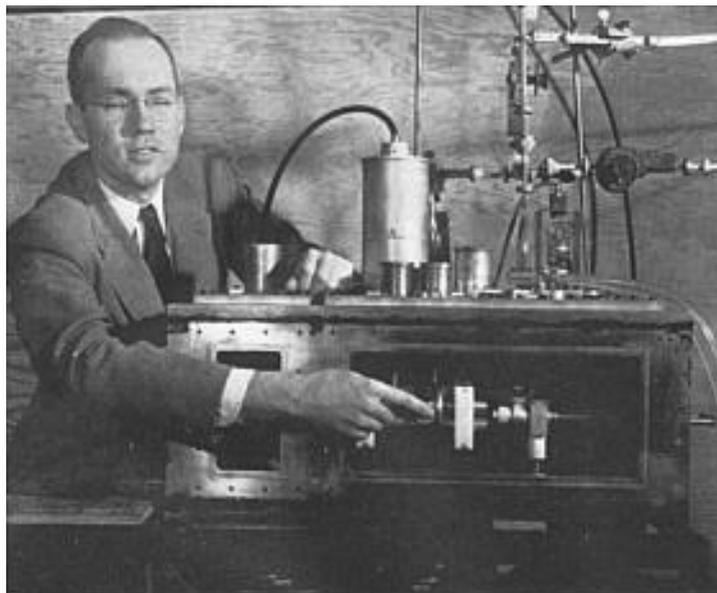


Figura 2: Townes con uno dei primi MASER

radiazione continua. Questo dispositivo produceva amplificazione per emissione stimolata con stati di spin elettronico del cromo, presente come impurità nel rubino; grazie ad un'idea di Bloembergen (Physical Review, 1956) era possibile ripopolare in continuazione gli stati elettronici eccitati, ottenendo radiazione continua. Incidentalmente, questo dispositivo presentava una particolarità molto utile: dato che i livelli di spin elettronico del cromo hanno energia variabile con l'applicazione di un campo magnetico esterno, la radiazione prodotta era *regolabile in frequenza*. Questa caratteristica, assieme all'alto guadagno e al basso rumore, resero tale MASER l'amplificatore d'eccellenza per l'astronomia radio.

Un'altra tappa fondamentale si ebbe nel 1960, quando Goldenberg, Kleppner e Ramsey svilupparono una sorgente MASER ad idrogeno con l'eccezionale stabilità di una parte su 10^{13} , a 1.4 GHz. Quel MASER fu utilizzato come orologio estremamente preciso per ripetere l'esperienza di Michelson e Morley, provando l'invarianza della velocità della luce con precisione ancora maggiore: l'applicazione dell'emissione stimolata ribadiva sperimentalmente la correttezza della relatività speciale.

Dalle microonde al visibile

Realizzata l'amplificazione per emissione stimolata con le microonde, era naturale che Townes—assieme a Schawlow—pensasse a fenomeni analoghi in altre regioni dello spettro elettromagnetico; in particolare, i due scienziati si concentrarono sul visibile, pubblicando un articolo sulla costruzione di un MASER ottico su Physical Review di fine 1958. Ma realizzare praticamente l'amplificazione con emissione stimolata nell'ottico non fu immediato: c'era la difficoltà di trovare un adeguato materiale da eccitare, e la minor lunghezza d'onda in gioco richiedeva apparati e misure molto più precisi; come sem-

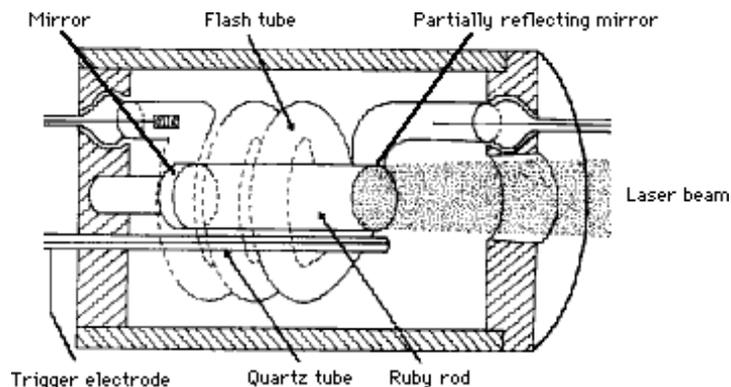


Figura 3: Il LASER a rubino di Maiman

pre, lavorando con piccole lunghezze d'onda errori anche piccoli possono pregiudicare il risultato dell'esperimento.

Soltanto due anni dopo, nel 1960, T. Maiman (Hughes Corporation Research Laboratory) riuscì a realizzare il primo LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sfruttando un cilindro di rubino posto tra due specchi. Il mezzo veniva sottoposto all'inversione di popolazione con un intenso flash luminoso, ottenuto con una lampada a scarica; successivamente una diseccitazione spontanea innescava la valanga di diseccitazioni stimolate, che risultava in un impulso luminoso amplificato anche dalla risonanza ottica dei due specchi. Come il primo MASER, era un setup in grado di produrre solamente luce pulsata. Immediatamente dopo, Sorokin e Stevenson idearono un LASER solido a 4 livelli, in grado teoricamente di lavorare in regime di emissione continua; nella pratica, tale regime si dimostrò impossibile con un mezzo solido.

La fine del 1960 segnò una tappa fondamentale: si riuscì ad ottenere il famoso LASER ad elio-neon (Javan, Bennet e Herriot) in grado finalmente di produrre radiazione continua. Il funzionamento era radicalmente diverso dal modello di Maiman, in quanto l'eccitazione del mezzo non avveniva con un flash luminoso ma con una scarica elettrica. Per ottenere l'emissione stimolata con un LASER di questo tipo si sfrutta la vicinanza energetica di due livelli eccitati dei gas elio e neon. La scarica elettrica popola il livello dell'elio e successivamente, con l'urto tra le molecole dei due gas, l'energia disponibile viene trasferita al neon popolando il suo livello. Questo livello (metastabile) è infine soggetto alla valanga di diseccitazione stimolata—simile a quanto avveniva nei dispositivi precedenti—che genera la radiazione coerente. Tale processo però avviene in continuazione, e mentre parte del neon si diseccita l'elio sta già ripopolando il livello metastabile; questo permette di ottenere radiazione continua. Il LASER ad elio-neon ebbe una grandissima diffusione nei vent'anni seguenti, ad esempio nei lettori di codici a barre o come sistema di puntamento. Per ottenere più efficienza e stabilità anche questo tipo di LASER veniva posto tra due specchi, in modo da creare una cavità risonante ottica per la radiazione coerente emessa. Inoltre gli estremi del tubo contenente i gas venivano inclinati in modo tale che la luce vi incidesse all'angolo di Brewster; così facendo veniva amplificata solamente una direzione di polarizzazione della luce, ottenendo radiazione non solo monocromatica e coerente ma anche *polarizzata*: ciò ampliava indubbiamente l'utilità di questo tipo di sorgente.

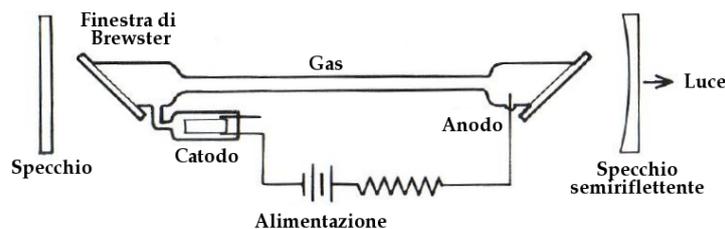


Figura 4: Schema di LASER ad elio-neon

Dato che il nuovo LASER a gas era piuttosto limitato in potenza, nel 1964 Patel iniziò a sperimentare con diverse miscele di gas, in particolare monossido e biossido di carbonio; mescolandoli con azoto, elio e acqua riuscì a controllare finemente il processo in modo da ottenere potenze più elevate. Nello stesso anno Bell ottenne l'emissione stimolata con una miscela di elio e ioni di mercurio, aprendo la strada ai LASER a ioni che successivamente portarono allo sviluppo di modelli a vapori metallici.

Ricerche negli anni seguenti videro la realizzazione di LASER molto particolari in cui il mezzo veniva eccitato nei modi più vari, ad esempio con reazioni chimiche o addirittura rapidi abbassamenti di temperatura per espansione.

Dopo il LASER a gas, una pietra miliare fu segnata dai dispositivi a semiconduttore, presentati nel 1962 da quattro gruppi indipendenti guidati da Hall (General Electric Research Development Center, Schenectady, New York), Nathan (IBM Research Laboratory, Yorktown Heights, New York), Holonyak (General Electric Syracuse, New York) e Rediker (MIT Lincoln Laboratory, Lexington Massachusetts). Si trattava di giunzioni p-n all'arseniuro di gallio, che generavano radiazione coerente nell'infrarosso quando percorse da correnti elevate. Il funzionamento di questo tipo di dispositivi—detti anche *diodi laser* essendo sostanzialmente dei diodi—è radicalmente diverso dagli altri LASER, sebbene ovviamente sia sempre basato sul processo descritto da Einstein. Avendo a che fare con un semiconduttore solido si hanno, anziché livelli discreti di energia, bande energetiche praticamente continue di una certa larghezza. In condizioni normali gli elettroni del mezzo si trovano praticamente tutti nella *banda di valenza*, e la *banda di conduzione* è quasi vuota; in queste condizioni il materiale è un cattivo conduttore. Sottoponendolo ad un'intensa eccitazione elettrica è possibile però innescare la produzione di coppie lacuna-elettrone, facendo salire in banda di conduzione molti elettroni e svuotando la banda di valenza, il che rappresenta proprio un'inversione di popolazione. A questo punto alcuni elettroni ricadono spontaneamente nella banda di valenza per ricombinarsi con delle lacune, emettendo quanti di energia pari al salto energetico tra le bande; tale radiazione stimola la diseccitazione di altri elettroni, innescando la valanga di diseccitazione stimolata che produce la radiazione coerente. LASER di questo tipo sono più compatti e consumano meno dei modelli a gas, ma ovviamente non possono raggiungere le loro potenze.

Applicazioni delle nuove sorgenti

L'utilità del LASER e le sue possibili applicazioni furono evidenti fin dalla costruzione dei primi dispositivi. Basta pensare al campo delle comunicazioni: la luce LASER ha

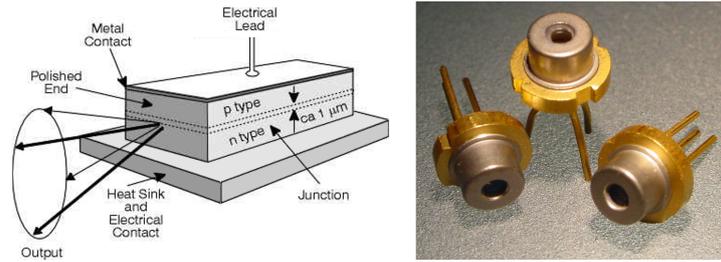


Figura 5: Schema di giunzione LASER a semiconduttore e moderni diodi LASER

una frequenza ben più elevata delle onde radio, quindi utilizzandola come portante si possono trasmettere segnali a frequenza molto maggiore. Nel caso di informazione digitale, questo si traduce in maggiore velocità.

Tuttavia, già verso il 1964 il fervore verso la nuova sorgente di luce iniziò a venire meno: costruire un LASER e mettere in pratica le applicazioni pensate si dimostrava più difficile del previsto. Ad esempio non si riuscivano ad ottenere LASER di potenza veramente elevata, il che impediva le applicazioni militari ideate dal governo statunitense; d'altra parte i problemi legati alla realizzazione di diodi LASER a temperatura ambiente non facilitavano l'ingresso di questi dispositivi nel campo delle comunicazioni. Per un certo periodo, perciò, i LASER si limitarono a rimpiazzare sorgenti di luce come le lampade ad arco in xenon o mercurio.

In seguito—con il conflitto in Vietnam, la crisi energetica del 1973 e la nascita delle questioni legate all'ambiente—si investì molto sul LASER come strumento di puntamento, spionaggio, comunicazione e monitoraggio ambientale. In particolare il campo delle comunicazioni fiorì definitivamente con la realizzazione della fibra ottica (1970, Kao e Hockham) e di diodi LASER a bassa corrente funzionanti a temperatura ambiente. Inoltre, ricerche portate avanti da Patel e DeMaria permisero di avere radiazione pulsata con tempi brevissimi e potenze molto elevate (dell'ordine dei gigawatt), il che estese l'uso dei LASER alla chimica e alla spettroscopia permettendo misure più precise di diversi ordini di grandezza, grazie alla piccola lunghezza d'onda, grande intensità e stabilità della luce. Furono possibili anche tipi di spettroscopia completamente nuovi, magari basati su fenomeni già noti ma che richiedevano radiazione che solo un LASER poteva fornire; degne di nota sono la *spettroscopia Raman* e la *spettroscopia non lineare*.

L'effetto Raman, scoperto nel 1928, rappresenta in sostanza la diffusione inelastica di fotoni da parte di molecole. Osservando le particolari righe spettrali da esso originate è possibile risalire alla struttura dei livelli energetici di vibrazione di una molecola. Un fotone ha però una bassissima probabilità di interagire con una molecola in questo modo, perciò l'unico modo di osservare l'effetto Raman è usare sorgenti estremamente intense; in pratica, serve il LASER. Con la *spettroscopia non lineare* si hanno invece interazioni di più fotoni con una singola molecola. Essendo presenti particolari regole di selezione per interazioni di questo tipo, la spettroscopia non lineare è un potente strumento per indagare la struttura degli stati fisici delle molecole. Anche questi fenomeni hanno una probabilità piccolissima e richiedono quindi sorgenti intense per essere notati.

Oggi

I LASER sono ormai uno strumento diffuso in moltissimi campi, anche ben più banali della ricerca scientifica.

La monocromaticità e coerenza della luce prodotta da queste sorgenti consente di sfruttare l'interferenza ottica per eseguire misure con precisioni enormi; i settori che impiegano questo sistema sono parecchi, dal controllo di regolarità di superfici nell'industria fino a esperimenti di relatività generale come la ricerca di onde gravitazionali.

Nell'industria si usano macchine a controllo numerico che sfruttano LASER a miscele di gas per produrre radiazione con potenze estremamente elevate, in grado di tagliare con grande precisione materiali che vanno dalla plastica ai metalli.

L'odierna diffusione della banda larga su fibra ottica non sarebbe possibile senza i diodi LASER, oggi estremamente piccoli e abbastanza veloci da consentire lo scambio di grandi quantità di dati in breve tempo. Lo stesso tipo di sorgente è usata in qualsiasi drive CD e DVD, che richiede luce coerente e grande precisione spaziale per accedere alle tracce contenenti i dati.

La possibilità di concentrare grandi energie in una piccola banda di frequenze e collimare accuratamente il fascio di luce permette in ambito medico di eseguire operazioni molto precise sull'organismo pur mantenendo lontani gli strumenti dal punto operato. Esempi famosi sono le svariate operazioni che possono essere effettuate sulla retina.

Tornando al mondo della ricerca, uno degli usi più interessanti del LASER è il controllo di piccolissime quantità di atomi per le ricerche in ambito quantistico. Combinando le particolari proprietà della radiazione coerente e polarizzata con campi magnetici opportunamente sagomati e sfruttando l'effetto Doppler ottico è possibile non solo sospendere e "intrappolare" pochi atomi, ma addirittura *raffreddarli* fino a energie estremamente basse. Questo ha permesso ad esempio di dimostrare sperimentalmente l'esistenza dei condensati di Bose-Einstein, e recentemente di iniziare la sperimentazione nell'ambito dell'informatica quantistica: con un insieme di raggi LASER continui e pulsati è possibile infatti costruire e controllare un registro di bit quantistici (*qbit*) composto da pochi ioni intrappolati.

In tempi recentissimi insiemi di raggi LASER straordinariamente intensi, focalizzati su un piccolo bersaglio, sono persino usati per innescare reazioni di fusione nucleare in esperimenti di fisica dei plasmi.

È ben noto che il principio di indeterminazione non consentirà di restringere infinitamente la banda di frequenze emesse dai LASER futuri, nè di creare impulsi di luce esattamente definiti in tempo e in frequenza; tuttavia la ricerca andrà sicuramente avanti per molto tempo, e se non riguarnerà direttamente lo sviluppo di nuovi LASER comunque li utilizzerà come la più versatile sorgente di radiazione elettromagnetica mai realizzata.

Bibliografia

- A. Einstein, *Emission and Absorption of Radiation in Quantum Theory*
- A. Einstein, *On the Quantum Theory of Radiation*
- R. Serway, C. Moses, C. Moyer, *Modern Physics (Second Edition)*
- A. Bettini, *Le onde e la luce*
- N. Bloembergen, *Proposal for a new type solid state MASER* (Phys. Rev., 1956)
- A technical history of the laser, http://ksks.essortment.com/historyoflaser_rsnny.htm
- The Diode Laser,
<http://www.ieee.org/organizations/pubs/newsletters/leos/feb03/diode.html>
- Quantum Information Theory Group, <http://www.qubit.it>
- Construction and Operation of a One-Meter Helium Neon Laser,
<http://www.jklasers.com/HeNe/HeNe.Laser.Report.htm>
- Wikipedia, <http://wikipedia.org> (articoli vari e immagini)