

Los láseres. Principios fundamentales

JOSE MANUEL ORZA SEGADE,
*Profesor de Investigación del CSIC.
 Instituto de Estructura de la Materia*

JOSE MANUEL ORZA SEGADE

JOSE Manuel Orza Segade, nació en Puente Ulla (La Coruña), en el año 1931; estudió el bachillerato en Lugo, la licenciatura en Química en Santiago de Compostela y realizó un doctorado en Química-Física en la Universidad Complutense de Madrid. Es Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), en el que fue creador y Jefe de la Unidad de Física Molecular del Instituto de Estructura de la Materia. Fue también durante siete años Director de este Instituto.

Ha sido el Director del Programa Movilizador del CSIC "Láseres y sus Aplicaciones" (1985-88), y es actualmente representante español en el "CO₂ Laser Council" del Proyecto EUROLASER. Ha promovido la creación de la "Fundación Madrid-Láser", que mediante un acuerdo entre el CSIC y el Instituto Madrileño de Desarrollo, implantará un Centro de Aplicaciones Industriales de los Láseres al servicio de las actividades industriales y académicas de la región de Madrid.

UN INSTRUMENTO DE TRABAJO VERSATIL

LOS primeros láseres, uno de rubí y después uno de helio neón, funcionaron en laboratorios de investigación en los Estados Unidos en 1960. Desde entonces, éstos y otros tipos de láseres (la mayor parte de ellos desarrollados inicialmente en la década de los años 60) han venido introduciéndose continuamente en una gran variedad de aplicaciones, en las comunicaciones, medicina, fabricación industrial, sistemas militares, y otras que afectan más directamente a la vida diaria, como supermercados y espectáculos audiovisuales.

A la vez, se han convertido también en un instrumento de trabajo inapreciable e insustituible para un gran número de tareas de investigación científica, desde cuestiones de fundamentación de las teorías científicas más generales —mecánica cuántica, relatividad, gravitación, etc.— a detalles extremadamente finos, indicativos de todo tipo de efectos sobre los estados de energía de átomos, moléculas, iones u otros componentes de la materia y de su interacción con la radiación electromagnética.

Todo esto hace del láser el protagonista de un nuevo tipo de actividad industrial. La fabricación de láseres y sistemas láser (sistemas que utilizan o incluyen láseres en su diseño) ocupa actualmente en el mundo occidental, a unas mil doscientas empresas, con cifras globales de ventas en torno a seis mil millones de dólares.

Coincidiendo con este desarrollo y, en gran parte, como resultado de una interacción sinérgica, se ha producido una proliferación de otras tecnologías, dispositivos y sistemas, basados en la interconversión de señales y energías ópticas y electrónicas. Es éste el campo de actividad de la electro-óptica, con aplicaciones de análoga importancia en los mismos o análogos ámbitos de actividades que los láseres.

Las actividades combinadas de estos dos campos, a cuya reunión suele aludirse con el término "fotónica", dan lugar a la existencia de unas dos mil empresas a nivel mundial, con cifras de ventas anuales de decenas de miles de millones de dólares.

¿Por qué ese carácter versátil de los láseres, aplicables a prácticamente cualquier clase de actividad? Un haz láser es energía en la forma de un haz luminoso. (Un "concentrado de luz", se dice a veces de la radiación emitida por un láser). Esto significa energía altamente organizada, disponible y utilizable en función de los varios parámetros que pueden distinguir o caracterizar a un haz de luz; que se puede llevar fácil y rápidamente de un sitio a otro, señalar o codificar en alguno de sus varios parámetros, concentrar en un punto preciso, exactamente con las características apropiadas para alguna acción deseable. Es "energía a medida" que sólo es necesario saber utilizar para hacer con ella todo lo que se quiera.

UN HAZ DE LUZ COHERENTE

UN láser es una fuente de luz. El sol, un cuerpo incandescente, un tubo de neón (de un anuncio luminoso) son también fuentes de luz. Un haz de radiación (o luz) láser y un haz de luz ordinaria se diferencian fundamentalmente en lo que los expertos llaman su coherencia: *el láser es una fuente de luz coherente*".

Para comprender este concepto debe recordarse que la luz se comporta en muchos experimentos físicos como un fenómeno ondulatorio; como constituida por ondas electromagnéticas. En otros experimentos, sin embargo, se describe mejor como formada por un flujo de "corpúsculos de energía" o "fotones". La teoría cuántica asume y concilia ambos aspectos. Un físico notable propuso por ello introducir una nueva

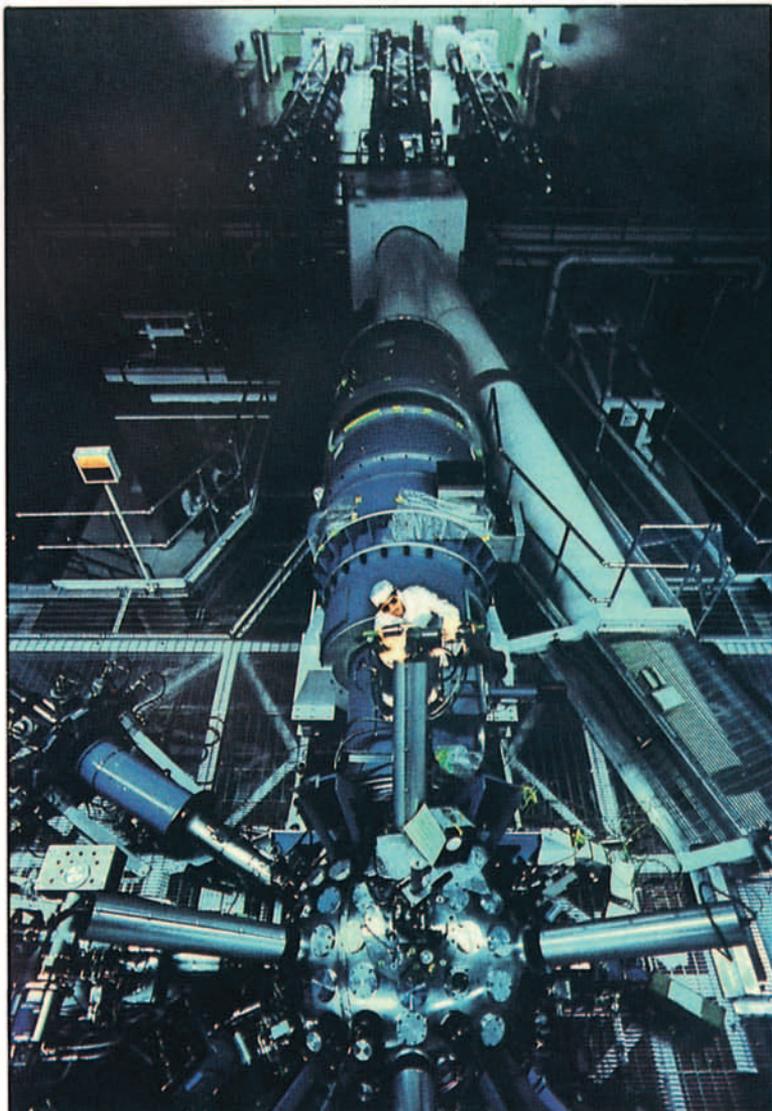
palabra, un híbrido de onda y partícula, "ondícula" por ejemplo, para describir la situación. No podemos entrar aquí en la fundamentación de la mecánica cuántica por lo que nos arreglaremos con la idea de un fenómeno ondulatorio que propaga energía electromagnética a la velocidad más grande posible, la velocidad de la luz.

De acuerdo con esa idea, un rayo de sol incidiendo, por ejemplo sobre una hoja de papel, se describiría como constituido por un gran número de pequeñas ondas que llegan a la vez a esa superficie, procedentes del sol, sin prácticamente ninguna otra relación entre ellas. En el caso de un haz de radiación láser, sin embargo, hay relaciones definidas entre las ondas (o las ondículas) componentes.

En cualquier fenómeno ondulatorio, como es, por ejemplo, el caso de las ondas que se propagan, en la superficie de un estanque, se distinguen una serie de características del tipo de la distancia entre ondas consecutivas (longitud de onda), del número de ellas que pasan en la unidad de tiempo, por un punto dado (frecuencia) y, con más generalidad, el estado de movimiento (o de "perturbación") de un punto dado, (que puede estar alto, bajo, en algún punto intermedio, etc.). El término técnico que caracteriza este "estado de movimiento" es *la fase*. Un fenómeno ondulatorio cualquiera es *coherente* si existen *relaciones de fase definidas*, bien entre distintos puntos del medio en el que se establece el fenómeno (por ejemplo, de un frente de ondas), bien en un punto dado, entre tiempos diferentes. Se habla, en el primer caso, de *coherencia espacial* y en el segundo de *coherencia temporal*.

Frecuencia, polarización, fase, son también características de las ondículas, o de los fotones que componen un haz luminoso. Estos fotones pueden o no estar correlacionados entre sí en un haz de luz dado; si lo están el haz es coherente. Son posibles también grados en cuanto a la coherencia de un haz. En cualquier caso, un haz láser es siempre un haz coherente.

Una analogía simple es la de una tropa en movimiento. Un haz láser es como una tropa formada, uniformada y llevando el paso. Un haz de luz ordinaria es como una multitud que va a lo largo de un camino (y todos a la misma velocidad) pero cada cual a su aire.



Aplicación del láser a la energía disuasión.

TABLA I. Bombeo del Medio Activo

TIPO DE BOMBEO	MEDIOS	ALGUNOS EJEMPLOS
Óptico	estado sólido	láser de Rubí y Nd-YAG
	líquidos	láser de colorante
	gaseosos de fotodisociación	láser de I
Paso de corriente eléctrica	gaseosos { átomos neutros iones moleculares	He-ne, He-Cd, Cu
		Ar ⁺ , Kr ⁺
		Co ₂ , N ₂ , excímeros
Térmico (dinámica de gases)	estado sólido (semiconductor)	Ga As
	gaseosos	CO ₂ -N ₂ -H ₂ O
Químico	mezcla de gases inyectados a gran velocidad	F + H ₂ → HF ⁺ + H
Electrones de baja temperatura en un plasma	gaseosos { iónicos nucleares	Sr-He (Sr ⁺)
Radiación por desviaciones múltiples de partículas ligeras por campos magnéticos		He-Hg, CO
	láser de electrones libres	

De la coherencia espacial se deriva el carácter de "direccionalidad" típico de los haces láser, que pueden enviarse a grandes distancias sin apenas "abrirse". Aunque incluso un haz láser tiene una cierta divergencia, inevitable, esta puede ser muy pequeña: se mide en términos de miliradianes. Es este carácter de direccionalidad lo que permite enfocar toda la energía transportada por un haz láser en "un punto" o, mejor un pequeño círculo con un radio del orden de la longitud de onda de la luz (de 10 a 1 milésimas de milímetro (μm) en el infrarrojo, de $0,5 \mu\text{m}$ en el visible).

La coherencia temporal se relaciona con el carácter monocromático en la radiación y hace posible la interferencia de "partes" de un mismo haz láser que han recorrido caminos diferentes. Aplicada a la medida de longitudes, la interferometría láser permite apreciar hasta décimas o centésimas de micra (milésima de milímetro) en distancias de varios metros.

El grado de monocromaticidad de la radiación láser, o pureza espectral, es especialmente importante en Espectroscopia; los láseres de colorantes producen radiación con anchuras espectrales tan pequeñas como la cienmillonésima parte de la frecuencia de la radiación utilizada. Con precauciones especiales para estabilizar y reducir aún más esta anchura pueden lograrse estándares de frecuencia con pureza superior a 1 parte en 1 billón (10^{12}).

LA EMISION ESTIMULADA DE RADIACION, FUNDAMENTO DEL LASER

EL fundamento del láser, la posibilidad de crear un haz de luz coherente, estriba en el concepto de emisión estimulada de radiación.

Para su mejor comprensión conviene considerar brevemente los procesos de absorción y emisión de radiación electromagnética. Estos procesos constituyen uno de los mecanismos principales por los que los cuerpos físicos intercambian energía con su entorno. A través de ellos puede, eventualmente, alcanzarse un equilibrio termodinámico.

Si comunicamos energía a un cuerpo material, por alguno de los varios modos posibles de hacerlo, sus unidades componentes (átomos, moléculas o distribuciones más complejas) *se excitan*: pasan de un cierto estado energético a otro con mayor contenido de energía. El retorno del estado excitado a un estado más bajo (el inicial u otro) se hace frecuentemente con *emisión* de la diferencia de energía en la forma de un "cuanto de luz" (o una "ondícula" en el lenguaje alternativa que indicábamos más arriba). La frecuencia de esa onda es proporcional a la diferencia de energía de los niveles entre los que el átomo, la molécula, o el sistema que sea, experimenta la transición.

Los cuerpos que vemos coloreados *absorben* algunos de los colores de la luz visible, con frecuencias equivalentes a diferencias de energía entre posibles estados de sus componentes. Hay también absorción a frecuencias características de cada sustancia en las regiones infrarroja y ultravioleta. Por supuesto, para que una sustancia absorba luz tiene que haber en la luz incidente fotones con la frecuencia justa, correspondiente a la diferencia de energía entre los niveles característicos de esa sustancia.

A través de un simple razonamiento termodinámico (basado en poco más que el principio de conservación de la energía) Einstein mostró en 1917 que tienen que existir relaciones cuantitativas estrictas entre las tasas de absorción y emisión, de tal manera que la emisión de luz por átomos excitados puede ser influida por la presencia de un "campo de radiación".

En otras palabras, el proceso de emisión generalmente considerado espontáneo, puede también ser inducido. Si el proceso es inducido el nuevo fotón es idéntico en todo al inductor: tienen la misma frecuencia y polarización, la misma dirección de propagación y la misma fase. La probabilidad de esta emisión inducida es tanto mayor cuanto mayor es la densidad de fotones inductores presentes.

El concepto de emisión inducida hace imaginable la "elaboración" de un haz de luz coherente de alta potencia a través de un proceso de *amplificación* de luz. Para ello se debe excitar convenientemente un sistema material, llevando sus componentes a niveles de energía altos, desde los que puedan ser estimulados a emitir, en coincidencia con un haz coherente inicial más débil.

LOS COMPONENTES ESENCIALES DE UN LASER

PARA hacer una fuente de luz coherente, un láser, es necesario aún añadir un *resonador*, con el que se pueda crear el haz inductor y mantenerlo en contacto con el medio activo para retroalimentar el amplificador. El dispositivo utilizado para ello ha sido el "resonador de Fabry-Perot", constituido esencialmente por dos espejos de alta reflectividad capaces de retener entre ellos la radiación luminosa cuya longitud de onda sea una fracción exacta de la longitud del resonador. El haz inductor se puede crear así, a partir de la emisión espontánea, seleccionando los fotones que van y vuelven de uno a otro espejo casi exactamente en la dirección del eje del resonador.

El lector puede haber advertido ya que si hay radiación que induce la emisión de un fotón correspondiente al tránsito material $E_2 \rightarrow E_1$, esta misma radiación puede también ser absorbida para producir el tránsito inverso $E_2 \leftarrow E_1$. Para que se pueda dar la amplificación, la población del estado superior E_2 tiene que ser mayor que la del inferior E_1 , lo que es lo contrario de lo que ocurre en condiciones de equilibrio térmico, de modo que esa condición se denomina, bastante significativamente, de *inversión de población*. Cuanto mayor sea esta inversión, mayor puede ser la "ganancia" del proceso de amplificación.

Es claro que esta inversión sólo se puede lograr y mantener si se suministra suficiente energía mediante un mecanismo de *bombeo* adecuado. En el caso ideal, este bombeo debería ser selectivo, para poblar el nivel (E_2) deseado y no otros, si no es así el rendimiento energético será bajo y el medio activo se calentará.

En resumen, figura 1, un láser se compone esencialmente de un medio activo, capaz de actuar como amplificador de luz cuando se bombea mediante un mecanismo apropiado, encerrado en una cavidad resonante con las menores pérdidas posibles. El resonador suele consistir en dos espejos enfrentados (generalmente curvos), uno de los cuales es ligeramente transparente para permitir el paso de un haz de salida, el haz láser.

UN PAR DE EJEMPLOS

La unidad que presentan básicamente todos los tipos de láseres, al nivel de los principios fundamentales, contrasta con la gran variedad de realizaciones prácticas posibles, relacionada con los diferentes medios utilizables que a su vez condicionan los mecanismos de bombeo necesarios. La tabla 1 indica diferentes métodos de bombeo utilizados para lograr la inversión de población en relación con los medios a que se aplican.

La figura 2 presenta esquemáticamente el montaje del primer láser de rubí. Tal como fue descrito por Maiman en 1960: "un cristal de rubí, con dimensiones de 1 cm., recubierto de plata en dos caras paralelas que se irradió con una lámpara de destellos de alta potencia". El cristal, sintético, contenía como medio activo iones de cromo dispersos (como impurezas sustitucionales) en la red cristalina del corindón (óxido de aluminio). En este caso se tiene un mecanismo de bombeo óptico: los iones Cr^{3+} absorben luz (verde) y pasan a un estado excitado del que una fracción decae al estado superior de la transición láser. Esta, finalmente origina pulsos de luz coherente, de color rojo.

Aunque se siguen fabricando aún láseres de rubí para ciertas aplicaciones (especialmente holografía), el láser de estado sólido más utilizado hoy es el de Nd—YAG, que tiene como medio activo iones de neodimio dispersos en la estructura cristalina de un granate (de ytrio y aluminio), que utiliza también bombeo óptico, puede funcionar de modo continuo o pulsado y emite en el infrarrojo, a la longitud de onda de 1 micra.



Láser en banco óptico

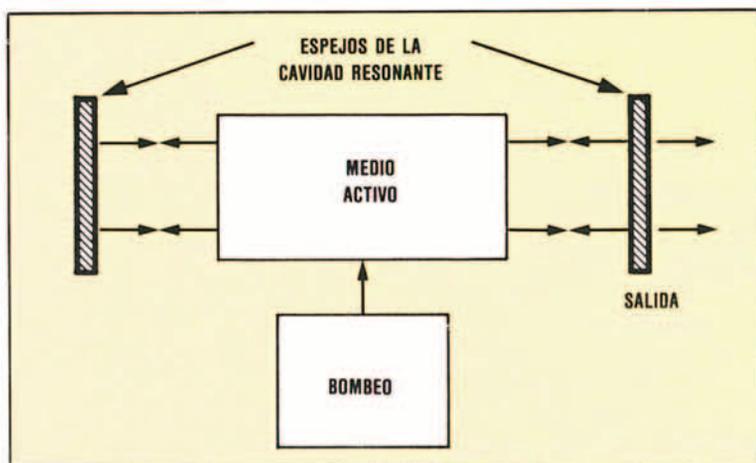


Figura 1. Componentes esenciales de un láser.

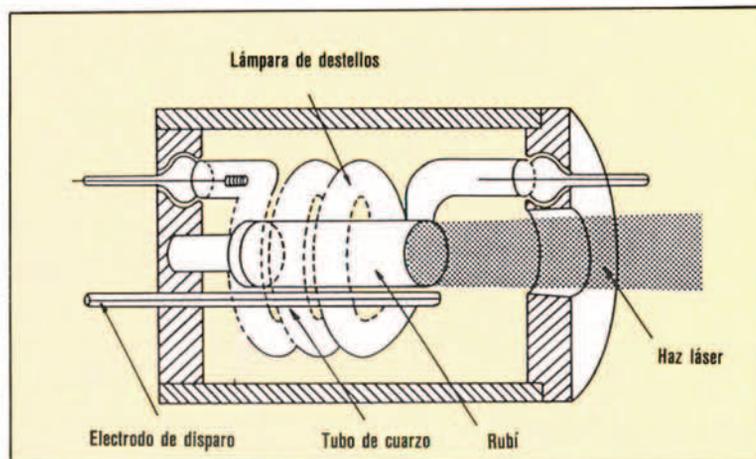


Figura 2. Disposición del primer láser de rubí, montado en tubo de 1960.



Aplicación del láser en criminología mediante la identificación de huellas digitales.

El segundo láser que se construyó también en 1960 fue el de helio-neón, con un medio activo gaseoso, en el que el neón es el elemento con niveles de energía apropiados para producir la transición láser. Es bombeado generalmente por una descarga eléctrica que produce una corriente continua de electrones entre dos electrodos en el seno de la mezcla gaseosa. Este láser puede funcionar con distintas transiciones, con emisión en el infrarrojo y en el visible. El primer láser mostrado en 1960 (al que se refiere la figura 3a, con bombeo por radio frecuencias) emitía en infrarrojo; hoy es más frecuente utilizar la emisión visible, en el rojo a 632 nm, como se puede ver en sistemas de control en supermercados, o en sistemas de audio y videodiscos, impresoras láser y sistemas para alineamientos ópticos. La potencia de salida de este tipo de láseres es más bien pequeña, del orden de miliwatios. Los tubos modernos suelen ser "sellados", con los espejos del resonador soldados directamente al vidrio en los extremos del tubo de descarga (Figura 3 b).

TIPOS PRINCIPALES DE LASERES, DE INTERES COMERCIAL

SEGUN los datos publicados el pasado enero por la revista especializada "Laser Focus/World", la cifra total de ventas de láseres en el "mundo occidental" en 1988 fue de unos 633 millones de dólares, que se reparten entre distintos tipos de láseres más importantes (comercialmente) en la manera que se indica en la Tabla 2.

Como se ve en la tabla, los más importantes de todos (desde ese punto de vista) son los láseres de diodos semiconductores (que, aunque son también sólidos, es habitual considerar separadamente de los

TABLA 2

Tipos de láser	Número de unidades	Cifra de ventas	Aplicaciones principales, según su volumen económico
Estado sólido	3.600	112	Militares, I + D, Proceso de materiales
Dióxido de carbono	3.830	123	Proceso materiales, Medicina, I + D
Iónicos (Ar ⁺ y Kr ⁺)	15.785	110	Medicina, Artes Gráficas, I + D, Metrología, Exhibiciones
Diodos	18 x 10 ⁶	180	Comunicaciones Ópticas, I + D, Militares, Metrología
Helio-Neón	274.800	50	Artes Gráficas, Metrología, I + D, "Scanners", Militares, Medicina
Colorantes	1.205	21	I + D
Excimeros	417	24	I + D, Proceso de materiales
Helio-Cadmio	2.620	13	Artes Gráficas, I + D

Número de láseres de diferentes tipos vendidos en 1988 y valor estimado, en millones de dólares. (Incluyendo componentes para reposición). (Adaptado de "Laser Focus World", enero 1989).

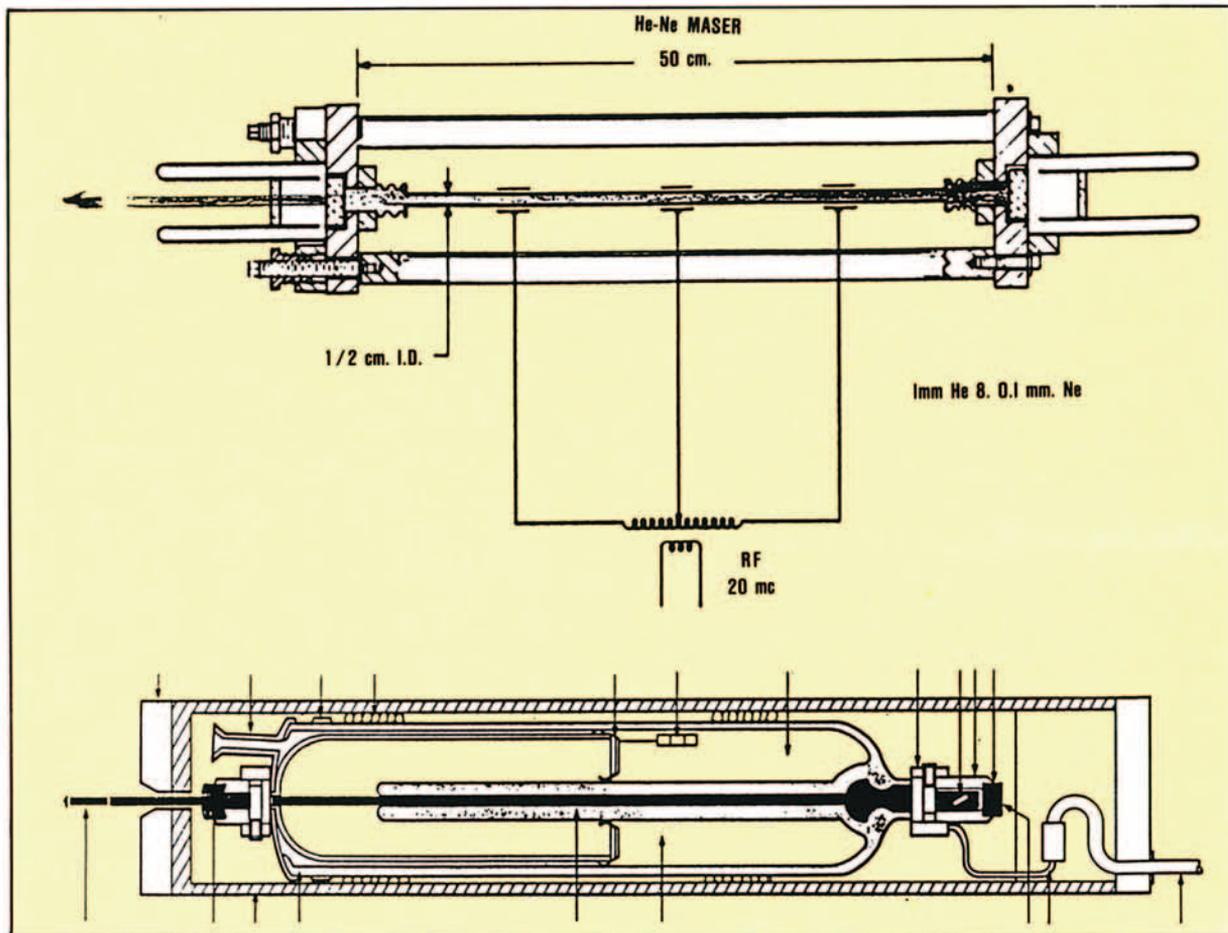
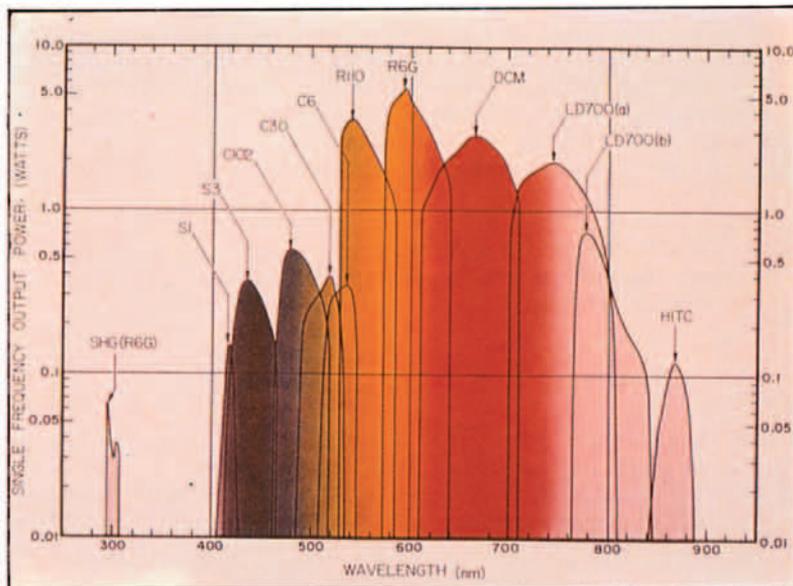


Figura 3. Esquemas de láseres de helio-neón. Arriba, el primero, montado en 1960. Abajo, un tubo comercial de 1980; las flechas señalan veinte detalles (mejoras) que, según el fabricante, garantizan la más alta calidad y fiabilidad.

denominados "de estado sólido"); representan el 28% del valor total. Son, por otra parte, los de menor tamaño, con dimensiones del orden del milímetro, los de bombeo más fácil (mediante una simple corriente eléctrica) y los de más alto rendimiento energético. Se fabrican por millones cada año y, como es fácil imaginar, son una especialidad japonesa.



Espectro de radiación de los láseres de tinte.

Les siguen en importancia los láseres de CO₂ (19%) y los de estado sólido (18%), utilizados predominantemente para aplicaciones de procesamiento de materiales para manufacturas metálicas. Pueden tener potencias medias de kilovatios (hay comercialmente láseres de CO₂ hasta de 25 kilovatios y de Nd-Yag hasta de 1 kW). Quizás no esté de más señalar que el láser más grande del mundo, del tamaño de un campo de fútbol, es el llamado "Nova", instalado en Lawrence Livermore National Laboratory (USA) y es un láser de estado sólido (con oscilador de Nd-YAG y amplificadores de Nd-vidrio) utilizado para ensayos de interés militar y estudios de fusión nuclear por el método de confinamiento inercial.

Otras cifras, en porcentajes, rezan: iónicos 17%, HeNe 8%, colorantes 3%, excímeros 4% y He-Cd 2%. ■