

LUZ, MATERIA Y EL NANOMUNDO

por

Ángela S. Camacho B.*

Resumen

Camacho B., A. S.: Luz, Materia y el Nanomundo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **26**(99): 197-206. ISSN 0370-3908.

La íntima relación entre luz, materia, espacio, tiempo y energía ha sido el objeto de estudio de la Física. Con el ánimo de ilustrar esta relación en el caso del desarrollo de la tecnología de la información durante el siglo XX y el estado actual mostraré cómo la invención del transistor y del láser dieron inicio a la carrera por la miniaturización que a su vez ha mostrado el Nanomundo físico con sus increíbles posibilidades de avances tecnológicos y las nuevas leyes de Nanociencia y la Femtociencia del siglo XXI.

Palabras clave: Luz, electrónica, comunicaciones, Nanociencia y Femtociencia.

Abstract

Physics studies the relation between light, particles, space, time and energy. The main aim of this contribution is to show the rapid development on communications in the last century based on the invention of the transistor and the laser. Both of them started the competition for miniaturization, which show us the new world of Nanoscience and Femtoscience and their incredible possibilities in the future.

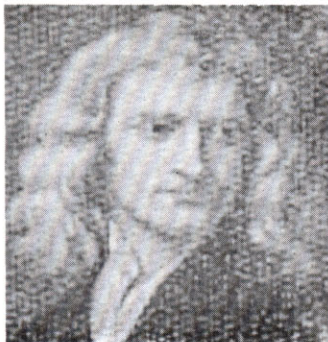
Key words: Light, particles, electronics, Communications, Nanoscience and Femtoscience.

Introducción

La luz ocupa un lugar muy especial en la historia del tiempo y del mundo. La Biblia comienza con la frase Y DIOS DIJO, HÁGASE LA LUZ Y LA LUZ FUE HECHA. En ese momento se inicia el tiempo para la humanidad según el mundo occidental. Pero también la ciencia ha creado su propia teoría del comienzo del tiempo y habla del Big Bang como el principio del universo. El Big Bang

es la explosión original a partir de un punto de compresión infinita, en el cual estaba concentrada toda la energía del universo que se convirtió en materia y antimateria. Antes de un segundo ya existían pares electrón-positrón y antes de un microsegundo existían pares protón-anti-protón. Después, a medida que el universo se expandía y se enfriaban las partículas y antipartículas, se aniquilaron hasta desaparecer originando gran cantidad de radiación electromagnética. La íntima relación entre tiempo, espa-

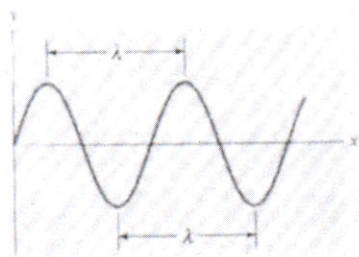
* Académica correspondiente. Profesora Universidad de los Andes, Bogotá, D.C. Colombia.



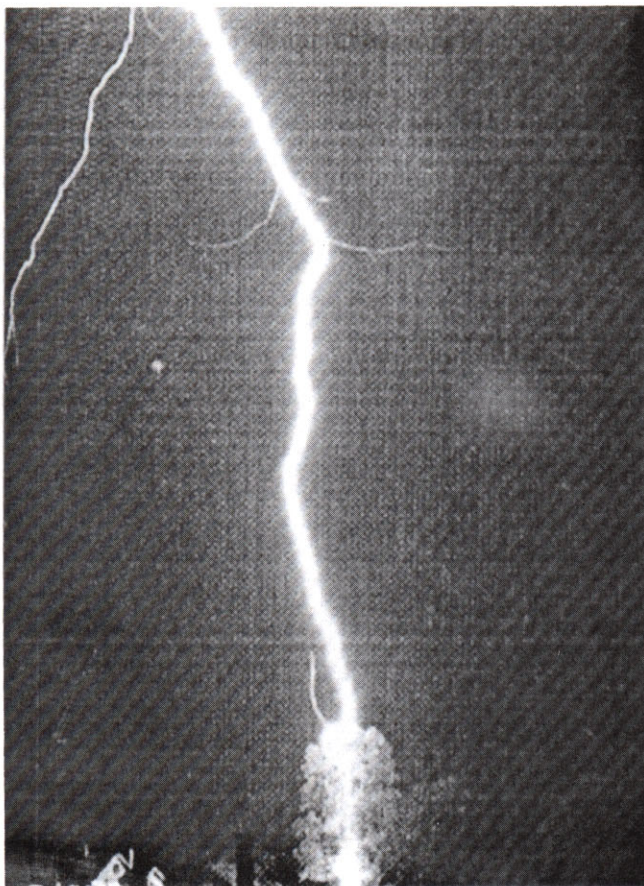
Sir Isaac Newton



James Clerk Maxwell



Heinrich Hertz



Interacción de la luz con materia

cio, materia y energía se entiende en la teoría del Big Bang. La luz, la materia y su interacción han sido, son y seguirán siendo el objeto de estudio de la Física. La contribución más importante hasta comienzos del siglo XX la hizo Sir Isaac Newton, quien no sólo descubrió las leyes del movimiento de objetos macroscópicos sino que también propuso una descripción de la luz como partícula. Sin embargo, el desarrollo posterior de la Física se inclinó por una descripción de la luz como una onda a la manera que está propuesta en las leyes de Maxwell, quien obtuvo una bellísima unificación de la electricidad y el magnetismo describiendo la luz como ondulaciones de estos campos que se propagan en el espacio. La energía transportada por una onda electromagnética se llama radiación electromagnética y esta energía se pone de manifiesto dependiendo del número de oscilaciones por segundo (frecuencia medida en Hertz) o de la longitud de esa oscilación que mide la distancia que ocupa una sola oscilación. Estas dos magnitudes están relacionadas a través de la velocidad de la luz. La radiación electromagnética tiene muchas caras. La más familiar es la luz visible. En el arco-iris las longitudes de onda van de 380 nanómetros (el violeta más profundo) a 750 nanómetros (el rojo más brillante). Un nanómetro es la milésima parte de una millonésima de metro. En las regiones de longitudes de onda más largas se tienen microondas y ondas de radio y televisión y en las de ondas más cortas que el visible está el ultravioleta y los rayos gama.

Las ondas electromagnéticas

Hasta el final de la segunda guerra mundial la región más utilizada del espectro electromagnético fue la conocida como HF o de alta frecuencia, esto significa ondas con frecuencia de 3 a 30 MHz (millones de Hertz o Megahertz) lo que corresponde a longitudes de onda de 10 a 100 m. En la década de los 60's se empezaron a usar frecuencias llamadas VHF (muy alta frecuencia) y UHF (ultra-alta frecuencia) que están relacionadas con longitudes de onda menor que un metro y hasta de decímetros. Estas ya dieron lugar al radio en FM y la televisión a color. En 1980 la idea del control remoto inalámbrico se basó en la posibilidad de producir y detectar ondas de centímetros que pertenecen a las SHF (supra alta frecuencia o micro-ondas). En los últimos años se han empezado a usar EHF (extremadamente altas frecuencias, del orden de los Gigahertz, 10^9 Hz) para introducir comunicación satelital.

Se acercan las comunicaciones con ondas milimétricas que corresponden a frecuencias superiores a 30 GHz. Dependiendo, entonces, de si estamos oyendo la BBC (100 kHz) ondas de radio, hablando por teléfono celular usa-

mos 3GHz o microondas o en una llamada a Europa 300 THz (10^{12} Hertz) cerca al infrarrojo, siempre estamos usando las ondas electromagnéticas.

Puesto que las frecuencias altas tienen mayor capacidad de transporte de datos que las bajas, la frecuencia de las bandas utilizadas para transmisión inalámbrica ha ido en continuo aumento desde decenas de MHz a mediados del siglo hasta los GHz en la actualidad.

Dispositivos electrónicos desarrollados en la segunda mitad del siglo XX han contribuido a los acelerados avances de las telecomunicaciones. Esto es, la longitud de onda se ha encogido del tamaño de un campo de fútbol (100 m) al tamaño de una ameba (1 décima de mm). En 5 años habrá alrededor de 1000 satélites de comunicación comercial. Muy pronto habrá plataformas de gran altitud sobre las ciudades enviando continuamente información. Además de la gran cantidad de formas de entretenimiento masivo de realidad virtual, su utilización para educación, salud, etc. es impensable. Los sistemas de telecomunicaciones espaciales modificarán nuestro modo de vivir en los próximos 20 años, proporcionando un rápido acceso a informaciones de todas clases desde terminales de bolsillo del tamaño de una cartera de mano en cualquier punto del planeta. Esta radiación es producida por circuitos oscilantes que poseen transistores de alta velocidad y han dado lugar a las técnicas inalámbricas trasladándose lentamente a ondas milimétricas. Por el otro extremo, los de frecuencias visibles y más altas son los láseres, fuentes de ondas electromagnéticas coherentes que se usan para telecomunicaciones con fibras ópticas.

Sin embargo, las dos tecnologías no se han encontrado; por un lado los transistores y los dispositivos basados en transporte cuántico se limitan a 300 GHz (50 GHz son el límite práctico, los dispositivos que trabajan más arriba son muy ineficientes). Por otro lado la longitud de onda de los láseres se extiende hasta 10 mm (30 THz). Entre las dos tecnologías está la llamada brecha de los THz.¹ En la referencia² se registra un nuevo láser semiconductor que produce una radiación intensa de 4,4 THz inyectando electrones en una estructura cuántica llenando así la brecha de fuentes de ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son las encargadas de llevar la información y ellas transportan energía. Se torna de vital importancia la transmisión de información, y la investigación del origen físico de la información. Con este objetivo quiero hacer un rápido viaje que muestre cómo la carrera hacia la miniaturización y las velocidades más altas ha llegado al nanomundo. Cuando hablamos del nanomundo estamos hablando de fabricar dispositivos del tamaño de una sola molécula de azúcar. Este cálculo fue

parte de la tesis doctoral de **Albert Einstein**, quien a partir de experimentos de difusión de azúcar en agua, mostró que la molécula mide un nanómetro de diámetro, esto es la millonésima parte del tamaño de la cabeza de un alfiler o lo que es lo mismo una fila de 10 átomos de hidrógeno uno al lado del otro. 100 años después del cálculo de Einstein la escala de los nanómetros salta al ruedo de la tecnología. Después de Investigación Biomédica y Defensa, la Nanotecnología es la disciplina de más interés que conjuga la Física de la Materia Condensada, la Ingeniería, la Biología Molecular y la Química.

El nanomundo es el mundo de las distancias de las moléculas de azúcar y de los tiempos ultracortos. Para tener una idea de lo que significa tiempo ultracorto recordemos el tiempo que gasta una señal para pasar de una neurona a otra en el cerebro que es de 0.05 milisegundos y este tiempo es largo en la escala de los femtosegundos. Tal vez se tenga una mejor idea si se piensa que un femtosegundo es a un segundo como un segundo es a 32 millones de años. El nanomundo también es el mundo en el que se ha observado la luz inmovilizada. El mundo nano es una misteriosa zona fronteriza entre el dominio de las moléculas y los átomos (cuántico) y el mundo macro (clásico) que resulta del comportamiento colectivo de trillones de átomos. Aunque la miniaturización de los circuitos en los microchips electrónicos es una de las razones principales del interés por la nanotécnica, son muchas las sorpresas que guarda el nanomundo para la Física Fundamental como lo predijo **Richard Feynmann** en 1959.

Semiconductores y Controlabilidad

Los dispositivos basados en materiales semiconductores, que no son ni buenos conductores ni malos conductores, permitieron controlar el movimiento de los electrones en materiales y además usar impurezas inyectadas desde afuera en cantidades controlables para manipular el comportamiento electrónico. Impurezas son átomos que poseen ya sea un electrón de más o uno de menos frente a los átomos del material base o anfitrión. De esta manera es posible tener SEMICONDUCTORES TIPO n y SEMICONDUCTORES TIPO p.

Al juntar estos dos tipos de materiales, se crea una corriente pues del lado con mayoría de electrones fluyen estos hacia el lado con déficit de electrones tratando de equilibrar la concentración. También se puede pensar que ese déficit (HUECOS) establece una corriente de huecos en la dirección contraria pero que va a reforzar la de los electrones porque su carga también es contraria. Esta corriente es la que se debe controlar externamente usando campos eléctricos o diferencias de potencial.



William Schokley, Walter Brattain y John Bardeen

El dispositivo (DIODO) está completamente controlado cuando cambiando la polaridad del campo eléctrico se logra interrumpir el paso de corriente, estableciendo así dos estados. PASA CORRIENTE (ON) y NO PASA CORRIENTE (OFF). También conocido en lenguaje de computadores como un bit.

En 1948 **William Schokley** puso en marcha el primer transistor basándose en el trabajo de **John Bardeen** y **Walter Hauser Brattain**, quienes habían encontrado un amplificador de estado sólido en 1947. Schokley usó dos junturas de diodo opuestas para diseñar su transistor. Es decir, una secuencia de semiconductor tipo n- semiconductor tipo p – semiconductor tipo n- **n-p-n** o **p-n-p** logrando con una juntura controlar lo que pasa en la otra y teniendo así, por primera vez, un dispositivo de tres electrodos, uno de entrada, otro de salida y el tercero de CONTROL. La juntura de entrada se llamó EMISOR o FUENTE, la de llegada, COLECTOR o SIFÓN y la de control se conoce como BASE. Cambiando la diferencia de potencial Emisor-Base, se controla la corriente en el colector logrando así estados ON y OFF controlados. Es decir, la famosa base binaria de 1 y 0.

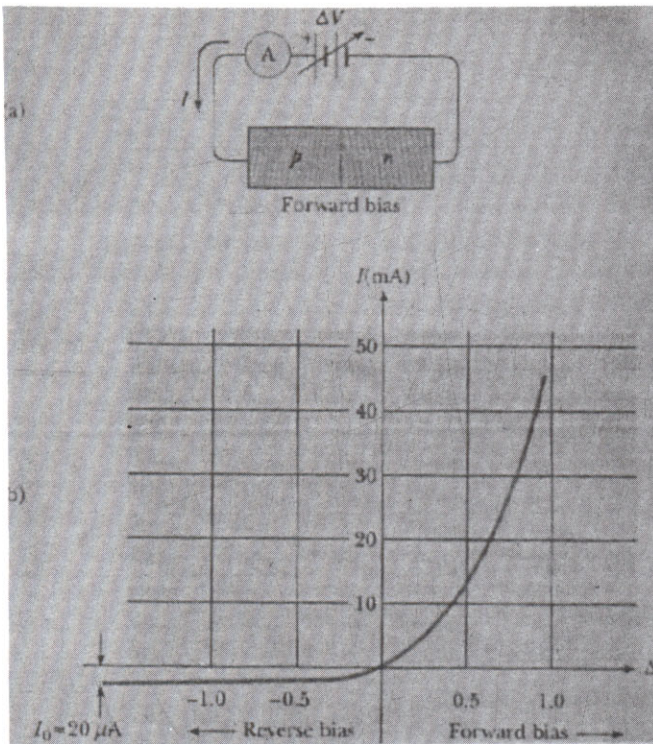
Celebramos en el año 1998 las bodas de oro del transistor. La tecnología actual de la Microelectrónica tiene como base fundamental EL TRANSISTOR. En los pasados 50 años hemos vivido la dramática miniaturización en la tecnología de computadores, pero sus principios básicos no han cambiado. Cada dos años los computadores se están haciendo dos veces más rápidos y sus componentes dos veces más pequeños. Los circuitos actuales contienen alambres y transistores que miden una CEN- TESIMA de un cabello humano (unos cien Angstroms)

Microelectrónica

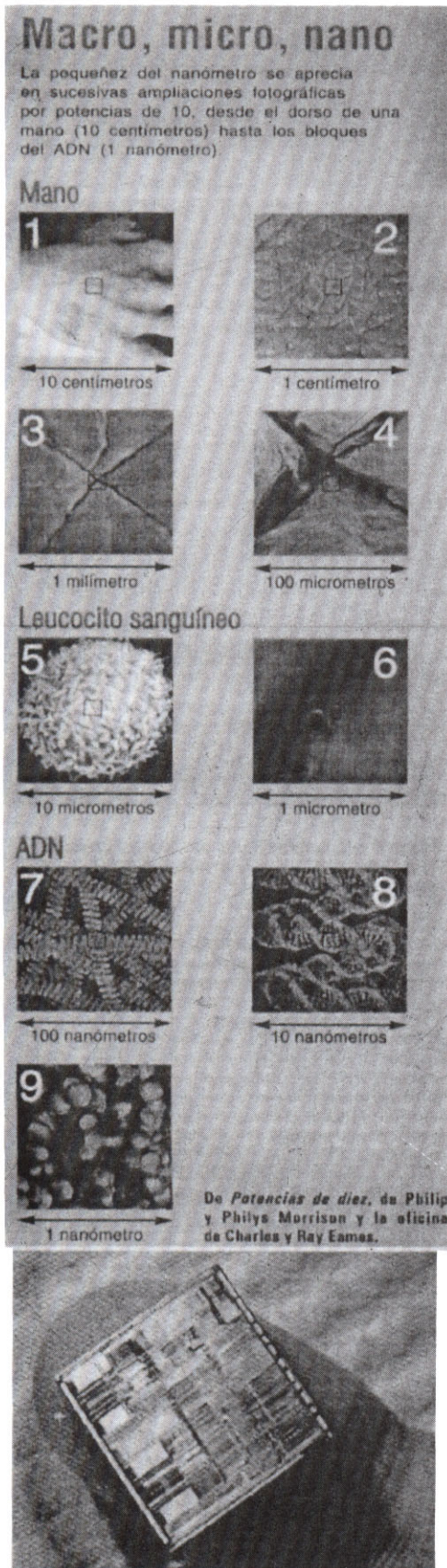
Primero el transistor y luego la agrupación de transistores para crear microprocesadores, chips de memoria y controladores. Sin embargo, la carrera de la miniaturización muestra que esta tecnología va llegando a su fin, se le da un tiempo de vida de 10 a 15 años porque al ir haciendo más y más pequeño el canal que une la fuente con el sifón, se ha llegado a un límite en el cual ya no se pueden despreciar filtraciones a través del óxido y fluctuaciones del material dopante.

Además otro tipo de problemas mucho más fundamentales se comienza a presentar. Cuando el tamaño del canal sea menor de 30 nm, la Mecánica Cuántica entra a jugar un papel preponderante y los efectos cuánticos dominarán.

La búsqueda de una creciente miniaturización ha transformado el mundo. La microelectrónica se basa en técni-



Diodo y curva característica corriente vs. voltaje



cas que fabrican estructuras de unos 100 nm (500 átomos de silicio) es insignificante para nuestra vida cotidiana pero es grande en el mundo de las moléculas y los átomos.

Se pueden distinguir dos clases de dispositivos de nanoescala: dispositivos convencionales escalados hacia abajo, encoger los mismos diseños y aquellos dispositivos basados en efectos cuánticos. Los primeros operan en regímenes de temperaturas y de campos eléctricos en los cuales la longitud de onda del electrón es menor que las dimensiones del dispositivo, entonces se trabaja como si el electrón fuera una partícula clásica. En los dispositivos cuánticos la naturaleza ondulatoria del electrón es fundamental y una o más dimensiones son comparables con la longitud de onda del electrón y entonces aparece toda la naturaleza cuántica de estas partículas.

¿Cómo rediseñar los dispositivos microelectrónicos para que funcionen a dimensiones ultrapequeñas? ¿Es posible producir transistores que exploten estos efectos cuánticos?

La Microelectrónica es la tecnología que caracteriza el siglo XX y el silicio es el átomo en su corazón.

En el nuevo mundo ultrafino se necesita encontrar una manera diferente de controlar los electrones. Se ha pensado en nuevos materiales y se han estudiado diferentes semiconductores mezclándolos creciendo capas que permitían manipular la brecha de energía se habló entonces de la Ingeniería de la brecha de energía. Esta técnica permitió confinar el electrón de tal manera que sólo se pueda mover libremente en dos, una o cero dimensiones. Esto hace que sus energías posibles estén cada vez mejor definidas y se pueda controlar externamente su comportamiento. Así se llegó a los dispositivos que manipulan los electrones de uno en uno³. En la última década, se ha propuesto el Transistor de un solo electrón (SET, SINGLE ELECTRON TRANSISTOR) que es un transistor controlado por una sola carga y operando bajo condiciones estándar, en las cuales el canal se ha reemplazado por una isla (piscina de electrones) conductora colocada entre barreras de potencial suficientemente altas, de tal manera que sólo se pueden atravesar por efecto túnel, un efecto esencialmente cuántico que permite atravesar barreras prohibidas. Se ha intentado usar otros materiales pero el Silicio sigue mostrando propiedades que todavía se pueden explotar y es así como en el transistor SET la propiedad más espectacular es que tanto la corriente que atraviesa como la capacitancia entre sus electrodos pueden variar en varios órdenes de magnitud cuando su carga cambia en un solo electrón. El principio es sencillo. Para estable-

cer corriente entre FUENTE y SIFÓN los portadores tienen que ser añadidos o removidos de la isla⁴.

Un desbalance de carga implica un costo de energía: La energía electrostática para cargar la isla. Si este cambio de energía es mayor que la energía térmica, el SET es un AISLANTE, pero aplicando un voltaje a la compuerta, se puede bajar la energía de la isla y así reducir la energía necesaria para cargarla por debajo de la energía térmica y entonces el dispositivo es un CONDUCTOR.

Ir de un estado al otro corresponde a añadir o quitar, en promedio un quantum de carga a la isla y como consecuencia la conductancia muestra oscilaciones periódicas como función del voltaje de compuerta.

Así como el siglo XX se caracteriza por la Microelectrónica se predice que el siglo XXI será de la Biotecnología. Luego el carbono se perfila como competidor del Silicio.

El silicio tiene cuatro enlaces y la posibilidad de dopado; añadir o quitar electrones ha dado a este material la posibilidad de ser la base de los diodos y de los transistores. Además la posibilidad de oxidarse para formar las compuertas metálicas de SiO_2 , base del transistor de efecto de campo. El carbono tiene el mismo número de electrones de valencia pero es mucho más flexible. Esta flexibilidad está detrás de su utilidad en Biología como el espinazo o columna vertebral de las moléculas biológicas

El transistor a temperatura ambiente basado en un nanotubo de carbón tiene propiedades muy interesantes para dispositivos. Es mucho más flexible cuando se trata de hacer enlaces. Colocando electrodos a los nanotubos se pueden obtener dispositivos. Tubos metálicos ya se han convertido en transistores de un solo electrón⁵. El nanotubo está entre dos contactos metálicos fabricados sobre una lámina de SiO_2 y se aplica un voltaje al substrato conductor para mover los portadores sobre el tubo. El tubo se puede prender aplicando un voltaje negativo al substrato, lo cual induce huecos sobre el tubo inicialmente no conductor. Este dispositivo es análogo a un transistor de efecto de campo tipo p con el nanotubo reemplazando el silicio como material anfitrión de los portadores de carga. La resistencia puede cambiar en muchos órdenes de magnitud y opera a temperatura ambiente⁶.

Pronto se tendrán diodos de nanotubo y transistores bipolares⁷. Dispositivos más exóticos son posibles, así un solo defecto puede cambiar la estructura de metálica a semiconductor, creando junturas metal-semiconductor que están compuestas de carbono y por lo tanto no habrá problemas de interdifusión.

El láser

La fuente de ondas electromagnéticas que más éxito ha tenido es el láser. El láser que nació en 1960 es un emparejado entre dos espejos, se le bombea con luz o con electrones y los electrones del material saltan a un nivel de más alta energía y luego caen emitiendo luz. Los fotones que rebotan inducen a otros electrones a emitir fotones idénticos a la manera de un castillo pirotécnico donde la explosión de unos petardos provoca el encendido de otros. A esta reacción en cadena se le denomina EMISIÓN ESTIMULADA. Conforme el número de fotones crece, se integran en una onda comunitaria que se va intensificando para acabar prorrumpiendo a través de uno de los espejos en un haz concentrado y focalizado. Pero no todos los fotones se integran en una onda, muchos se emiten en forma espontánea fuera de la reacción y se comportan como relativamente libres chocando contra las paredes y no contra los espejos calentando el medio. En algunos láseres sólo uno, de 10.000 fotones, se utiliza para el dispositivo. Entonces se necesita cierto umbral de energía para asegurar que el número de electrones excitados sea suficiente para inducir y mantener la emisión estimulada. Es como la temperatura necesaria para que una olla de agua hierva.

Láseres de estado sólido y de pozo cuántico

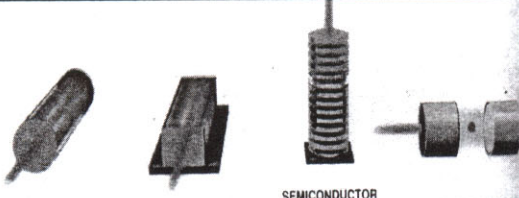
Láseres de gas y de estado sólido se basan en transiciones ópticas muy delgadas que conectan dos niveles discretos entre los cuales se obtiene la inversión de población por bombeo electrónico óptico.

En semiconductores las transiciones se hacen entre bandas de energía en las cuales los electrones en la banda de conducción y los huecos en la banda de valencia son inyectados en la lámina activa usando una juntura p-n produciendo una recombinación rápida radiativa a través de la brecha. La longitud de onda de la emisión está determinada por la brecha.

En los láseres de cascada cuántica, todavía en el laboratorio, la inversión de población se hace por inyección de portadores directamente a los escalones de energía producidos por el campo externo entre las diferentes unidades de la superred que pueden constar de dos o más pozos cuánticos. La novedad está en que ya no se usa la brecha de energía del semiconductor sino las transiciones intersubbandas. Estas son transiciones entre subbandas de una misma banda ya sea de conducción o de valencia con energías del orden de milielectronvoltios y dependientes del diseño del dispositivo.

Los láseres de semiconductor han reducido sus dimensiones hasta hacerse más pequeños que la longitud de

TIPOS DE LASER



	HELIO-NEON	YAG-NEODIMIO	SEMICONDUCTOR DE MICROGRAVEDAD	DE UN SOLO ATOMO
DISTANCIA ENTRE ESPEJOS	20 A 100 CENTIMETROS	5 A 15 CENTIMETROS	2 A 5 MICRAS	1 MILIMETRO
NUMERO DE ATOMOS	10 ¹⁴ ATOMOS DE NEON	10 ¹⁴ IONES NEODIMIO	10 ⁶ PARES ELECTRON HUECO	1 ATOMO DE BARIO
POTENCIA (WATT)	0.001	1.0	0.0001	0.000000000001

onda de la luz que emiten. Son discos de un par de micras de diámetro y una fracción de micra de espesor y se les conoce como los nanoláseres. En computadores la luz podría reemplazar el electrón. Los fotones reemplazan los electrones para transporte, procesamiento y almacenamiento de la información. También en el campo de la Medicina para detección precoz de enfermedades.

Un láser grande emite varios tipos de fotones como una cuerda larga de una guitarra que produce un sonido que consta de una frecuencia fundamental (tono) y muchos armónicos, pero a medida que la cuerda se acorta el tono sube y el número de armónicos disminuye hasta que el proceso alcanza un límite determinado por el espesor y el tipo de material de la cuerda. En el caso de los láseres ese límite es LA MITAD DE LA LONGITUD DE ONDA DE LA LUZ EMITIDA, es la dimensión mínima para que la luz rebote entre los espejos. En esta frontera los fotones tienen un único estado posible (modo fundamental del dispositivo). Luego cada fotón se ve forzado a contribuir a la onda. Al intensificarse se engendra un haz que finalmente escapa a través del espejo. Ningún fotón se pierde.

Los microláseres, más desarrollados que nanoláseres, permiten alrededor de 100 estados fotónicos. Esto significa un gran ahorro de energía. El límite es obtener una onda continua de un solo modo.

Operación sin umbral

Se han propuesto láseres de pozo cuántico que aprisionan no sólo electrones sino también los fotones que se reflejan al cambiar de un material a otro por el cambio de índice de refracción. Si las láminas de los espejos están formadas de capas alternantes con un espesor de la cuarta parte de la longitud de onda, la geometría de la estructura permite que las reflexiones se refuercen. Con este método se logra el 99% de reflexión mejor que un espejo de un cuarto de baño. Y un rendimiento por encima del 50%, lo cual supera la eficacia de los láseres de diodo de semicon-

ductor con un 30%. Este rendimiento también se observó en el láser de un solo átomo. Un átomo excitado en el espacio libre emite un fotón espontáneamente en una dirección aleatoria. Pero en una cavidad resonante el átomo emitirá el fotón más rápido hacia los espejos espaciados de manera precisa. Si otro átomo excitado entra en la cavidad, la presencia del fotón causará que el átomo emita un fotón idéntico en la misma dirección pero de manera mucho más rápida⁸.

Fotones por encargo

Micro y nanoestructuras se dejan diseñar o confeccionar como lo hace una modista con un vestido. Pero ir más allá y encargar un solo fotón es el sueño de los investigadores de Óptica Cuántica, entre otras cosas porque son útiles en Ciencia de la Información Cuántica, Criptografía Cuántica y el Computador Cuántico. Los experimentos permiten en la actualidad crear un solo fotón y presentar una fuente de luz en la base del estado sólido con la cual se pueda controlar el tiempo de emisión y el número de fotones.

¿Cómo se pueden crear fotones aislados? Una manera intuitiva; el método consiste en debilitar un pulso de luz tanto que se llegue a un solo fotón. Pero esto no es posible porque la emisión de fotones de fuentes clásicas de luz obedece la estadística de Poisson. Esto significa que cuando se ha debilitado la luz hasta llegar a un solo fotón, se obtiene en el 37% de los casos ningún fotón, en el 37% un fotón y en el 26% restante más de un fotón. Esta última posibilidad se debe reducir y para esto trabajar con pulsos de 0.1 fotones en promedio y esto reduce mucho el número de fotones.

Se necesitan tres componentes para lograr una fuente de fotones que emita de a un fotón: Un emisor cuántico, un control del proceso de emisión y un sitio de corte. El emisor puede ser un átomo, una molécula o un par electrón-hueco en un semiconductor y estas fuentes producen fotones separados en distancia (photon antibunching). Estas son fuentes de fotones separados pero ellas no son determinísticas, lo que significa que no se puede controlar desde afuera la emisión. Esta emisión se da de forma casual. El control del punto de emisión se puede hacer de dos maneras: incoherente usando pulsos láser o coherente a través de un proceso adiabático en el cual la frecuencia de resonancia de la transición molecular se sintoniza lentamente a la frecuencia fija del láser hasta lograr la transición al estado excitado. El fotón es emitido dentro del intervalo de vida media del estado excitado. En el experimento se mide la función de correlación fotónica de segundo orden

que significa la probabilidad de detectar un fotón en el tiempo t si se tiene seguridad que se emitió uno en el tiempo cero ($t=0$)⁹.

El nanomundo

La herramienta reina para estudiar, sondear y manipular moléculas del nanomundo es el microscopio de efecto túnel con el cual la unidad de control aplica una fuerza electromotriz a la punta detectora y se recoge una corriente en la superficie, objeto de observación. Su principio reside en la conductividad electrónica que pasa por una punta metálica afilada que recorre, sin hacer contacto una superficie conductora. Los electrones que se comportan como ondas y como partículas llegan a la punta dependiendo de la proximidad de la superficie explorada. El microscopio va dibujando y reproduciendo la superficie. De este modo se pueden "VER" los átomos y los efectos atómicos de la superficie¹⁰.

En 1959 Feynman profetizó la existencia del nanomundo y aún en 1983 cuando se desarrolló el microscopio de efecto túnel la física de nanoescala no estaba clara. Veamos algunos ejemplos, 1987 durante un estudio de corriente eléctrica por contactos de punto cuántico se descubrió la cuantización de la conductancia que se produce cuando las propiedades ondulatorias de los electrones se mantienen coherentes desde la fuente hasta el sifón. Este descubrimiento fue el apogeo de la mesoscopía. Un segundo ejemplo, en 1985 en Moscú se mostró la posibilidad de controlar el movimiento de electrones individuales que ingresan o egresan de un islote de Coulomb. En dispositivos muy pequeños, estos efectos de transferencia monoeléctrica de carga podrían dominar el flujo de corriente. Hacia el 2014 el tamaño del rasgo más pequeño de los transistores integrados en los microcircuitos se reducirá a unos 20 nm. En esta dimensión intervendrá una carga de unos 8 electrones.

En 1987 en laboratorios Bell se obtuvo el primer transistor de un sólo electrón. El efecto de carga se conoce como BLOQUEO DE COULOMB y se ha observado en todos los dispositivos nanoescalares cuando se hacen pasar corrientes a través de moléculas. Uno de los retos en este campo estriba en aplicar dicho efecto para obtener acoplamientos robustos y reproducibles a moléculas pequeñas. En 1990 en Bell Communications Research estudiando transporte electrónico para desarrollar técnicas que ayuden a elucidar la naturaleza cuántica del flujo de calor exigió el diseño de nanoestructuras en suspensión a temperaturas muy bajas. A finales del verano de 1999 se observó por fin el flujo de calor a través de puentes de nitruro de silicio y apareció el límite al flujo calorífico en estructuras mesoscópicas. El cuanto de

conductancia térmica o sea la tasa máxima con la que puede transportarse el calor por una vibración mecánica singular y ondulatoria que se extienda desde la entrada hasta la salida del dispositivo nanométrico. Este es el límite infranqueable para el problema de la disipación de energía y a su vez el límite a la eficacia disipativa del calor en un dispositivo muy pequeño.

Resumiendo, conductancia eléctrica, conductancia térmica y bloqueo de Coulomb significan cortes abruptos de nuestro conocimiento y son leyes nuevas del nanomundo.

Algunos problemas que se tienen en el nanomundo a nivel de aplicaciones son:

I. Comunicación entre el nanomundo y el macromundo

En sistemas Nano Electro-Mecánicos (SNEM) un fleje nanoescalar anclado por ambos extremos vibra con mínima distorsión armónica cuando la amplitud de su vibración se mantiene menor que una pequeña fracción de su espesor. Si la barra es de 10 nm la amplitud es de uno o dos nm y la frecuencia natural de vibración aumenta al disminuir el tamaño de la barra. Se necesitaría resolver desplazamientos hasta de picómetros (pm) y aún de femtómetros (fm), o que exige un ancho de banda del orden de microondas.

II. El papel de la superficie. La hipótesis básica de la física del estado sólido es que la razón superficie a volumen de los dispositivos es pequeña, en sistemas nanoescalares esta hipótesis se viene abajo. En una barrita de 100 nm de largo y 10 nm de diámetro el 10% de los átomos se encuentran en la superficie.

Detener la luz

Reducir la velocidad de la luz que viaja a través del espacio vacío a 300.000 kilómetros por segundo es otro gran logro del nanomundo que además ofrece nuevas posibilidades para las comunicaciones ópticas y los computadores o quizás la posibilidad de experimentar con agujeros negros. En 1998 la física **Lene Vestergaar Hau** del Instituto Científico Rowland de Cambridge y su grupo vieron los primeros resultados. A finales del año 2000 los pulsos de luz se pararon dentro de nubes gaseosas enfriadas hasta cercanías del cero absoluto¹¹, es decir, se pudieron mantener los pulsos congelados durante unos momentos y luego si se liberó la luz para que prosiguiera su camino. Mientras está congelada la luz se podría hacer que los átomos del gas se deslicen sobre el pulso de luz para hacer estudios de los condensados de Bose-Einstein.

El proceso es el siguiente, antes de que el pulso de luz alcance la nube de átomos, los espines de los átomos están lineados, (se comportan como pequeños imanes) y un haz láser de acoplamiento convierte la nube en transparente para el pulso. La nube retarda y comprime el pulso y los estados de los átomos cambian en una onda que acompaña la luz retardada. Cuando el pulso está completamente dentro de la nube se apaga la luz de acoplamiento deteniendo la onda y la luz se desvanece a velocidad cero.

Luego se enciende de nuevo el haz de acoplamiento regenerando el pulso de luz que se vuelve a poner en movimiento.

Se trata específicamente de jugar con un sistema atómico de tres niveles¹², dos de los cuales están muy cercanos en energía y el tercero está 30.000 veces más alejado. La luz que induce la transparencia se sintoniza a la diferencia de los estados 2 y 3. Los átomos que están en el estado 2 la absorben; los átomos del estado 1 no pueden absorberla y se comportan como transparentes a esa luz.

Luego llega un tercer pulso sintonizado a 3, enreda los estados 1 y 2, lo que significa, que los átomos están en los dos estados simultáneamente. El estado 1 sólo absorbería la luz de exploración; el estado 2 sólo absorbería la luz de acoplamiento. Al actuar juntos se cancelan como en un tira y afloja que se llama interferencia cuántica y se tiene un estado oscuro. La velocidad de la luz depende tanto de la densidad de la nube de átomos como de la intensidad de la luz láser.

Aunque nubes muy densas dejan escapar átomos al exterior pulsos de acoplamiento muy débiles disminuyen

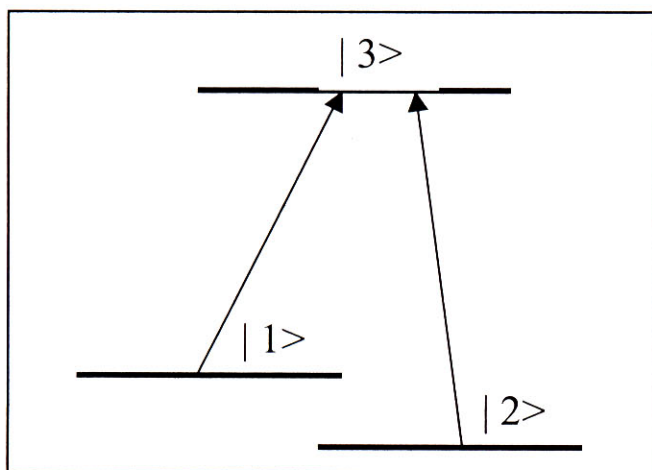


Figura 1. Esquema de un sistema de tres niveles para explicar el proceso de transparencia.

la velocidad de la luz pero no hacen la nube completamente transparente, entonces se apaga el haz de acoplamiento mientras el pulso comprimido y retardado está en el medio. El pulso de luz responde con una parada en seco y se extingue pero la información no se pierde. La información está grabada en los estados de los átomos como en una cinta magnética.

La estructura inmovilizada contiene toda la información sobre el pulso de luz. Por ejemplo, la proporción de los estados 1 y 2 se relaciona con la intensidad del pulso en cada posición. Se tiene un holograma escrito en los átomos de gas que se puede leer encendiendo el haz de acoplamiento. Se puede encender y apagar el haz de acoplamiento varias veces para regenerar el pulso en trozos. El sistema de luz retardada proporciona un método para pasar de los qbits (bits cuánticos) que pertenecen a un sitio e influyen sobre otro fácilmente (los estados cuánticos de los átomos) a los qbits que se desplazan de un lado a otro (fotones). Un proceso esencial en la construcción de computadores cuánticos.

Una vez hemos presentado el estado de miniaturización de los dispositivos usando un solo electrón o un solo fotón llegamos al mundo en el cual se puedan observar los procesos a tiempos realmente pequeños. ¿Cómo observar estos procesos? La respuesta está en usar luz pero no como una onda sino como un pulso que consiste en superponer muchísimos modos. Técnicas que usan pulsos tan cortos como tres ciclos ópticos revelan propiedades fundamentales de la materia.

Pulsos ultracortos

Esto significa muchísimos modos pero oscilando en sincronía perfecta produciendo un pulso intenso. Se usa entonces el prefijo ULTRA para describir estas escalas de tiempo y se habla de fenómenos ultra rápidos o de pulsos de luz ultra cortos. En el futuro se hablará de la Femto-ciencia como hoy se habla de la Nano-ciencia¹³. Esta región se alcanzó a través de mediciones con láseres nuevos que emiten pulsos de luz ultracortos. Pulsos ópticos se pueden comprimir para que su duración sea realmente muy corta, lo que significa ancho de banda de energía muy grande (1,85 a 2,15 eV). La base de este desarrollo es el láser Titanio-Zafiro. Dentro del ancho espectro de amplificación de un cristal de zafiro dopado con titanio se pueden producir pulsos de modo acoplado cuya duración abarque solo unos pocos ciclos ópticos del campo electromagnético. Esta duración tan corta está íntimamente relacionada con un ancho espectral fijo según el principio de incertidumbre de Heisenberg.

La primera generación de láseres de pulsos ultracortos sintonizables usó chorros de colorantes orgánicos disueltos en solventes viscosos. Ellos son de manejo difícil y tienen una potencia promedio de unos miliwatios, además, necesitan alta potencia para funcionar. El primer paso hacia láseres de femto-segundos más amigables fue el descubrimiento de cristales de banda ancha que emiten y amplifican longitudes de onda desde el visible al medio infrarrojo. Materiales de banda ancha como Zafiro dopado con Titanio que amplifica longitudes de onda de 700 a 1100 nm y soporta pulsos de hasta 4fs.

El mayor desafío para estos materiales fue producir una secuencia de pulsos y no una onda continua tratando de llevar millones de modos en fase.

Aplicaciones

Láseres en la región de THz ofrecen múltiples aplicaciones desde abrir pequeños huecos en las paredes del corazón para suministrar sangre oxigenada a los músculos cardíacos que tienen vasos bloqueados irreparablemente, y remover pequeños restos de la columna vertebral sin dañar el tejido nervioso adyacente hasta producir imágenes. Los pulsos ultracortos son especialmente efectivos porque su potencia promedio reduce el daño del tejido lateral. Producir imágenes que hasta ahora se basan en colorantes o moléculas naturales que responden a ondas muy cortas como la violeta. Longitudes de onda más largas penetran más eficientemente el tejido y causan menos daño a las células que ondas más cortas. La intensidad se puede ajustar para que la fluorescencia ocurra en el foco del haz dando como resultado una resolución muy alta. Esta técnica produce imágenes tridimensionales de mejor calidad.

En cirugía ocular creando a una profundidad exacta en la córnea una pequeña malla de cavidades interconectadas para corregir la miopía.

Un método similar permite tomar imágenes de microchips a través de su empaque plástico. Se usan rayos T, que es la radiación de THz del espectro electromagnético que corresponde a longitudes de onda entre 15 micrómetros y un milímetro. A longitudes de onda por encima del infrarrojo. Entonces penetran profundamente muchos materiales que son opacos a la luz visible. Muchos de los materiales conocidos son transparentes a los rayos T y ellos brindan imágenes con resoluciones superiores a las obtenidas con micro ondas porque tienen la capacidad de distinguir entre dos materiales muy similares por ejemplo, entre tejido sano y tejido quemado.

Para inspeccionar componentes electrónicas y para prevenir caída de dientes. También serían la solución para detectar armas cerámicas en aeropuertos.

Aplicaciones en Astronomía y atmósfera terrestre.

Como se puede ver las aplicaciones de esta región del espectro electromagnético son muy variadas y significan una mejora sustancial de la calidad de vida de la humanidad. Pero también desde el punto de vista de física fundamental la posibilidad de estudiar los procesos de la dinámica de portadores en tiempos de femto-segundos y su aplicación a más largo plazo en computación cuántica usando los procesos coherentes puramente cuánticos basados en control de la fase de las funciones de onda¹⁴⁻¹⁵.

Bibliografía

1. C. Sirtori. 2002, Bridge for the terahertz gap, *Nature* **417**, (May) 132-133.
2. R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. Beere, E. Linfield, A. G. Davies, D.A. Ritchie, R. C. Iotti & Fausto Rossi. 2002, Terahertz semiconducting-heterostructure laser *Nature* **417**, (May) 156-159.
3. D.C. Glatli, 1998, Single electrons in silicon drops, *Nature* **393**, (June) 516-517.
4. L.Guo, E. Leobandung & S. Y. Chou. 1997, A Silicon Single-Electron Transistor Memory Operating at Room Temperature *Science* **275** (January) 649-651.
5. P.L.McEuen, 1998, Carbon-Based Electronics, *Nature* **393**, (May) 15-17.
6. L.L.Sohn, 1998, A quantum leap for electronics, *Nature* **394**, (July) 131-132.
7. P.G. Collins & P. Avouris, 2000, Nanotubes for Electronics, *Sci.Am.* (December) 38-45.
8. M.S. Feld & Kyungwon An. 1998, The Single-Atom Laser, *Sci. Am.* (July) 57-63.
9. P. Michler & C. Becher. 2001, Photonen auf Bestellung, *Physikalische Blätter* **57** (9): 55-61.
10. J. Shah. 2000, Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures, 2. Edition, Springer, Berlin.
11. Lene Vestergaard Hau. 2001, Luz inmovilizada, *Innovación y Ciencia* (Septiembre) 4-12.
12. S. E. Harris. 1997, Electromagnetically Induces Transparency, *Physics Today*, (July) 36-42.
13. J. M. Hopkins & Wilson Sibbett. 2000, Big Payoffs in a Flash, *Sci. Am.* (September) 55-61.
14. E. Méndez & G. Bastard. 1993, Wannier-Stark Ladders and Bloch Oscillations in Superlattices, *Physics Today*, (June) 35-42.
15. T.Dekorsy et. al. 2000, Coupled Bloch-Phonon Oscillations in Semiconductor Superlattices, *Phys. Rev. Lett.* **85**(5): 1080-1083.