

# ELECTRÓNICA: CIENCIA E TECNOLOXÍA

---

*Diego Cabello Ferrer\**  
*Carlos Gómez-Reino Carnota\*\**  
 Universidade de Santiago  
 de Compostela

## 1. INTRODUCCIÓN

---

A Electrónica é unha rama da ciencia e a tecnoloxía bastante recente, que adquiriu entidade propia neste século e que continúa en constante e intensa evolución e interrelación con outras ciencias. Naceu como unha rama da Física e na súa orixe trataba de engloba-lo referente ás propiedades dos electróns libres no baleiro. Antes dos anos corenta, o termo 'electrónica' era utilizado case exclusivamente polos físicos, e con el referíanse ó electrón e as súas propiedades. Como tal rama, polo tanto, os seus antecedentes sitúanse a finais do século XIX, cando J. J. Thomson descubriu o electrón. Foi algo máis tarde cando se albiscaron as grandes vantaxes de controlar fluxos de electróns mediante os denominados dispositivos electrónicos, e produciuse entón un amplo e rápido desenvolvemento da Electrónica, tanto nos seus fundamentos coma nas súas aplicacións. Ó principio foron as fortes necesidades creadas xa por aquelas datas

nas comunicacións as que moveron este avance, seguindo pola radio, a instrumentación e os sistemas de control, a televisión e, máis recentemente, a denominada 'electrónica de consumo' e a informática.

Durante a primeira metade do século XX deuse un rápido desenvolvemento dos tubos de baleiro e dos circuitos nos que interveñen, o que de xeito natural motivou un importante avance na Teoría de Circuitos. Sen embargo, o grande pulo da Electrónica, responsable do nivel tecnolóxico actual, debeuse á substitución dos tubos de baleiro polos dispositivos semiconductores. Neste sentido, sinálase como fito histórico a invención do transistor, aínda que tamén o foi a introducción da tecnoloxía planar de silicio e o concepto de circuíto integrado.

Á vista destas consideracións, pode definirse a Electrónica dun modo xenérico como: "A rama da Ciencia e a Tecnoloxía que se ocupa do estudo das leis que rexen o tránsito controlado de cargas eléctricas en medios materiais e

\* Catedrático de Electrónica.

\*\*Catedrático de Óptica.

no baleiro, as propiedades nas que se basea, os dispositivos nos que ocorre e as aplicacións ás que dá lugar". Os seus contidos pódense agrupar pois en dous grandes apartados: Física de semicondutores e dispositivos electrónicos e circuítos e sistemas electrónicos. Como podemos inferir dos seus contidos, a Electrónica é unha área de coñecemento que participa das propiedades das 'ciencias do natural' (análise) e das 'ciencias do artificial' (síntese e tecnoloxía).

O perfeccionamento tecnolóxico necesario para obter dispositivos e circuítos con elevadas prestacións fixo que a Electrónica estendera lazos de dependencia a outras ramas da ciencia; un dos máis palpables é o que a liga coa ciencia dos materiais. Existen, con todo, outras relacións; por exemplo, o desenvolvemento recente das comunicacións ópticas propiciou que se intensifiquen esforzos no campo da Optoelectrónica, a través da cal a Electrónica se achegou á Óptica; noutro ámbito, a posibilidade de execución de microsistemas, que inclúen sensores e actuadores dentro do circuítos integrado, abriu posibilidades de aplicación e interrelación da Electrónica con outras parcelas, como por exemplo a Micromecánica. Non podemos esquecer as conexións entre a Electrónica e a Arquitectura de ordenadores ou coa Informática. Daquela, o deseño electrónico, no contexto das tecnoloxías modernas, é un campo multidisciplinar.

Os dispositivos electrónicos desenvólvense e modélanse como

resultado de estudia-las distintas propiedades dos materiais. O uso masivo destes dispositivos permite construír circuítos en moi alta escala de integración (VLSI) ou mesmo sistemas sobre un *chip* (SOC). A única forma de completa-lo deseño dun sistema complexo nun tempo razoable é mediante ordenadores para simular, optimizar e deseña-lo circuítos; xorde así o deseño asistido por ordenador (CAD). Coa conxunción destes catro compoñentes (materiais, dispositivos, circuítos e deseño asistido por ordenador) é posible aborda-lo reto de obter circuítos cada vez máis complexos.

A Electrónica naceu e desenvólvese, polo tanto, cun marcado carácter aplicado, que é o que lle confiere a súa autonomía. En consecuencia, o interese desta área polo movemento das partículas cargadas está condicionado á aplicación do dito movemento nos dispositivos electrónicos, para a posterior aplicación destes nos circuítos electrónicos; así é, a través das súas utilidades, como a Electrónica cumpre hoxe en día un papel primordial. O seu efecto sobre o avance científico e o tecnolóxico foi e é importantísimo, e ela mesma saíu beneficiada, o que propiciou que, nun proceso rexenerativo, se dispararan expectativas e aplicacións en menos de cincuenta anos (investigación básica — desenvolvemento tecnolóxico — instrumentación — nova investigación e desenvolvemento...). Ademais, a través das súas aplicacións, a Electrónica introduciuse en tódolos sectores, non só científicos e

tecnolóxicos en sentido estricto, senón tamén nos industriais, médicos, mercantís e financeiros, artísticos e, cada vez máis, nos utensilios comúns que nos rodean.

Neste traballo pretendemos mostra-los contidos da Electrónica analizando a súa evolución histórica a través dos descubrimentos dos dispositivos básicos. Unha análise paralela da evolución das súas aplicacións é prohibitiva por extensa e, ademais, as grandes aplicacións (control, proceso de datos, comunicación e instrumentación) permanecen. O que cambia é a tecnoloxía usada na súa realización.

Seguindo a S. Bracho (1999), nesta evolución histórica podemos distingui-las seguintes etapas:

- Do electrón ó transistor; antecedentes históricos da Electrónica.
- Do transistor ó amplificador integrado; primeiras etapas da tecnoloxía de semicondutores.
- O microprocesador no deseño de sistemas dixitais.
- Integración VLSI. Circuitos dixitais, mixtos e microsistemas.

Vexamos brevemente os principais logros acadados en cada unha destas etapas. Posteriormente completaremos-lo traballo mostrando as conexións da Electrónica coa Optoelectrónica e comentando a evolución desta última.

## 2. DO ELECTRÓN Ó TRANSISTOR. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DA ELECTRÓNICA

Como xa comentamos, os antecedentes da Electrónica sitúanse contra finais do século XIX. Podemos falar pois dunha etapa pre-electrónica que cobre os sucesos previos ó descubrimento das válvulas de baleiro (díodos e tríodos termoiónicos). Entre estes sucesos hai que considera-la obra de Maxwell, a xeración e detección de ondas electromagnéticas (Hertz), o desenvolvemento da radiotelegrafía (Lodge, Popou, Marconi), os raios catódicos (tubo de Geissler, 1860), o oscilógrafo (Braun, 1895), o descubrimento do electrón (Thomson, 1897) ou a formulación da teoría 'clásica' da conducción (Drude, 1900; Lorentz, 1905).

Sen embargo, é posible establecer que a Electrónica nace cos primeiros dispositivos que permiten o control por un campo eléctrico da conducción en válvulas de baleiro. Así, en 1905, A. Fleming descobre o díodo termoiónico, e en 1907 Lee de Forest, o tríodo. Ámbalas válvulas están baseadas na emisión termoiónica (Edison, 1883). O díodo nace buscando un detector de ondas. A introducción dun terceiro electrodo (gradicela metálica) entre ánodo e cátodo permitía o control da tensión catódica con outra moito menor aplicada na gradicela, de forma que a válvula amplificaba. Este fenómeno de amplificación de sinais eléctricos tivo gran transcendencia coa súa aplicación á transmisión de sinais

de radio, de rádar ou de TV, ou á amplificación de sinais de audio. A introducción de novas gradicelas levou ó tetrodo e ó pentodo. Apareceron tamén os tubos cheos de gas, entre os que destaca o tiratrón, que permitía a rectificación controlada.

Entre os circuítos máis notables desta época están os amplificadores operacionais, executados con tubos termoiónicos, que deron orixe ó cálculo analóxico e ós computadores analóxicos, hoxe extinguidos como tales.

Nesta época tódolos dispositivos electrónicos están baseados no movemento de electróns no baleiro ou en gases, baixo o control de campos eléctricos e magnéticos, e na xeración destes portadores mediante emisión termoiónica, fotoeléctrica ou secundaria. Podemos considerar que esta época dá cabo en 1948, coa invención do transistor. Emporiso, na actualidade aínda se seguen usando os tubos termoiónicos na amplificación de audio de altas prestacións.

### 3. DO TRANSISTOR Ó AMPLIFICADOR INTEGRADO. PRIMEIRAS ETAPAS DA TECNOLOXÍA DE SEMICONDUCTORES

A verdadeira orixe da Electrónica, tal como a coñecemos actualmente, hai que situala na aparición dos dispositivos de estado sólido. A partir dese momento, os dispositivos electrónicos máis relevantes asentan na inxección e

o transporte controlado de electróns libres e ligados no interior de cristais semiconductores (Ge, Si, GaAs...) nos que hai heteroxeneidades controladas que permiten realiza-las mesmas funcións que antes cumprían as válvulas e outras novas non pensadas ata agora. Nace así a electrónica dos semiconductores, pasando a primeira liña a Física do estado sólido.

#### 3.1 PRIMEIROS DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

O primeiro dispositivo semiconductor fabricado é o díodo de unión. O seu funcionamento baséase no feito de que a unión de dous semiconductores, un impurificado con impurezas de natureza aceptadora (semiconductor tipo P) e outro con impurezas doadoras (semiconductor de tipo N), xera unha barreira de potencial,  $V_{bi}$ , na zona da unión. Esta barreira pódese alterar mediante a aplicación dunha tensión exterior, aumentándoa ou diminuíndoa, o que fai que o dispositivo teña un comportamento asimétrico respecto da aparición dunha corrente, que dependerá da polaridade e valor da tensión aplicada. A figura 1 mostra un esquema da unión *pn* no que se distinguen as rexións neutras P e N, unha rexión desprovista de portadores libres (capa baleira) que se estende a ámbolos lados da unión metalúrxica ( $x = 0$ ), o potencial de barreira asociado e cómo estes quedan afectados pola polarización aplicada: directa se  $V_A$  é positiva, e inversa se  $V_A$  é negativa.

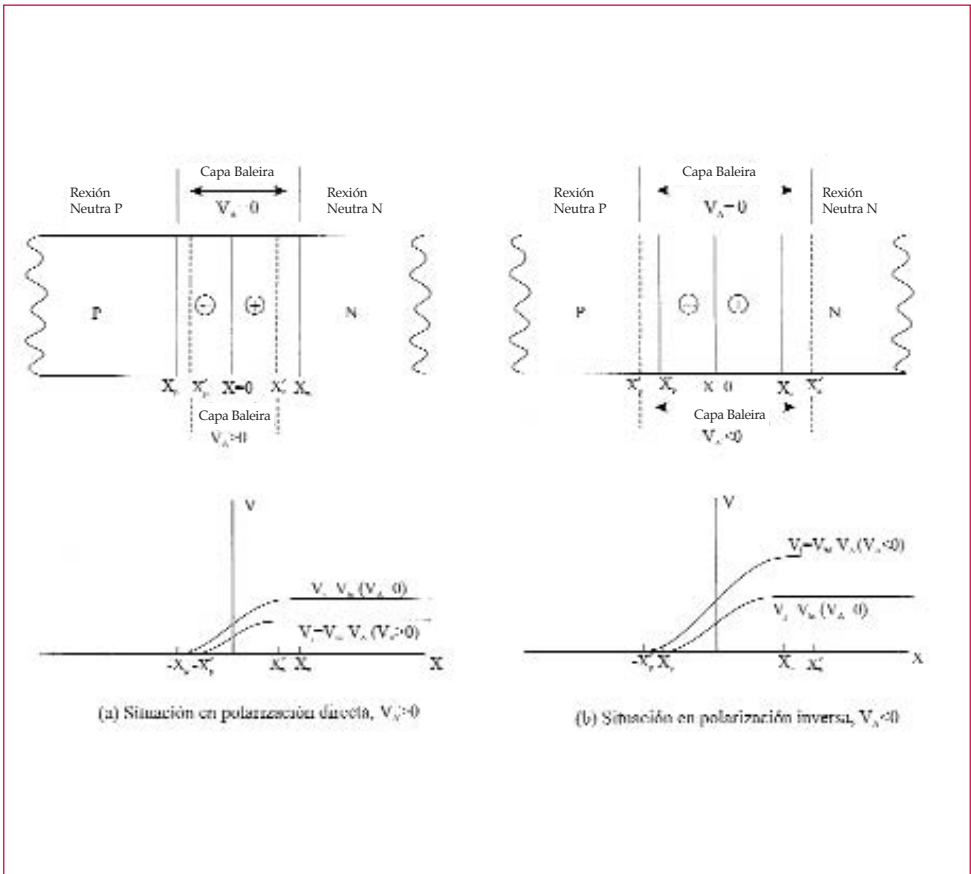


Figura 1. Esquema dunha unión PN en polarización directa e inversa e barreira de potencial xerada.

A teoría fundamental para a obtención das súas características tensión-corrente foi desenvolvida por Shockley en 1949 e posteriormente ampliada por outros autores. A figura 2 ilustra a forma da relación tensión-corrente nun díodo ideal; podemos observar que existen dous estados asociados ó tipo de polarización: nun deles —polarización directa—, o díodo actúa

practicamente como un cortocircuíto; no outro —polarización inversa—, actúa como un circuíto aberto. A corrente en polarización directa débese á inxección de portadores maioritarios nas zonas onde son minoritarios, que se difunden nela. En inversa dáse o fenómeno de extracción de portadores de onde son minoritarios. Por iso a corrente é moi pequena e negativa.

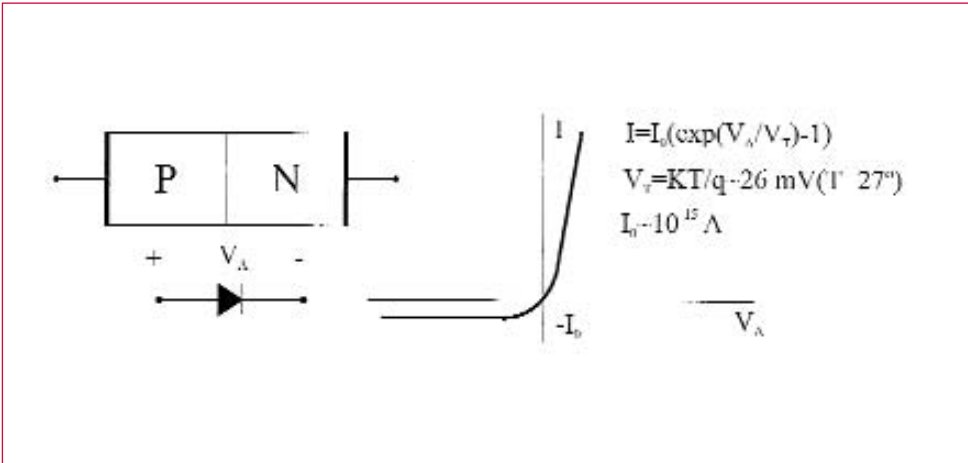


Figura 2. Diodo ideal: esquema, símbolo curva característica.

A importancia que ten a unión *pn* dentro da electrónica non é só polas súas aplicacións directas, senón tamén por se-la estrutura base no desenvolvemento doutros dispositivos. O descubrimento do transistor por un equipo de investigadores dos laboratorios de Bell Telephone ten un impacto sen precedentes na industria electrónica. O transistor nace como consecuencia da busca dun dispositivo de estado sólido que puidera substituí-lo tríodo termoiónico. Para iso fixéronse experimentos introducindo un semiconductor nun campo eléctrico, que fallaron debido á existencia de estados superficiais. Analizando estes estados, Barden e Bratman descubriron en 1947 o transistor de puntas de contacto. Pouco despois, en 1948, Shockley descobre o transistor bipolar de unión (BJT). Este está constituído por tres zonas semiconductoras impurificadas alternativamente

con impurezas doadoras e aceptadoras. Teremos polo tanto dous tipos de transistores, *pn<sub>p</sub>* e *np<sub>n</sub>*, tal como se ilustra na figura 3, na que recolleamos ademais o símbolo utilizado para a súa representación.

Podemos pensar no transistor *pn<sub>p</sub>* como en dúas unións *pn* moi próximas. Unha unión está constituída polo emisor e a base e a outra polas rexións de base e colector. A rexión de base é moi estreita, polo que a proximidade das unións fai que estas interaccionen entre si, o que dota o transistor da posibilidade de presentar ganancias de tensión ou de corrente.

O transistor bipolar posúe catro rexións de funcionamento, determinadas polas polaridades das tensións aplicadas a ámbalas unións. A zona máis común de funcionamento é a zona activa directa, que se corresponde

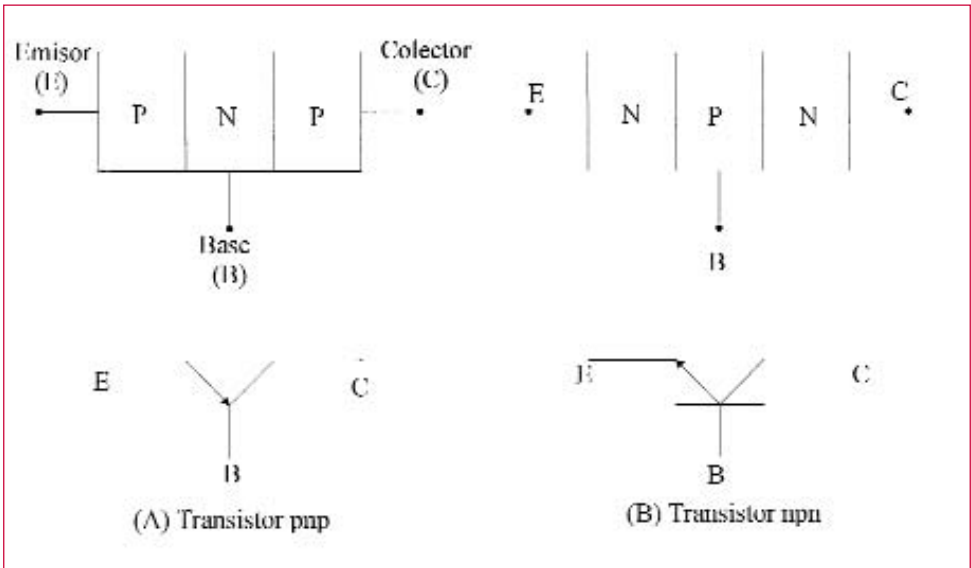


Figura 3. Transistores bipolares: estructura e símbolos.

cunha polarización directa da unión emisor-base e inversa da unión base-colector. As outras posibles combinacións de polarización conducen ás rexións de corte, saturación ou rexión activa inversa. Por outra parte, como o transistor é un dispositivo de tres terminais, ó ser estudado como elemento de circuíto, como tal cuadripolo, un dos terminais debe ser común á entrada e á saída, dando así lugar a tres configuracións básicas, que se denominan base común, emisor común e colector común, indicando estes nomes qué terminal é común á entrada e á saída.

A figura 4 amosa de forma cualitativa os fluxos de portadores existentes nun transistor bipolar  $p^{+}np$  en rexión activa directa ( $p^{+}$  indica rexión

fortemente impurificada) sobre unha configuración de base común. Mediante este esquema podemos ilustrar-lo efecto de ganancia en corrente.

O dispositivo  $p^{+}np$  polarizado na rexión activa directa require que o emisor teña un potencial maior có da base, e o colector un potencial menor có desta. Con esta polarización, o emisor inxectará unha gran cantidade de ocos na base; algúns electróns serán inxectados desde a base cara ó emisor. O efecto combinado é a creación dunha corrente positiva de emisor que crecerá exponencialmente coa tensión  $V_{EB}$ . A unión base-colector está polarizada en inversa, polo que os fluxos de portadores estarán asociados á extracción de portadores de onde son minoritarios; é

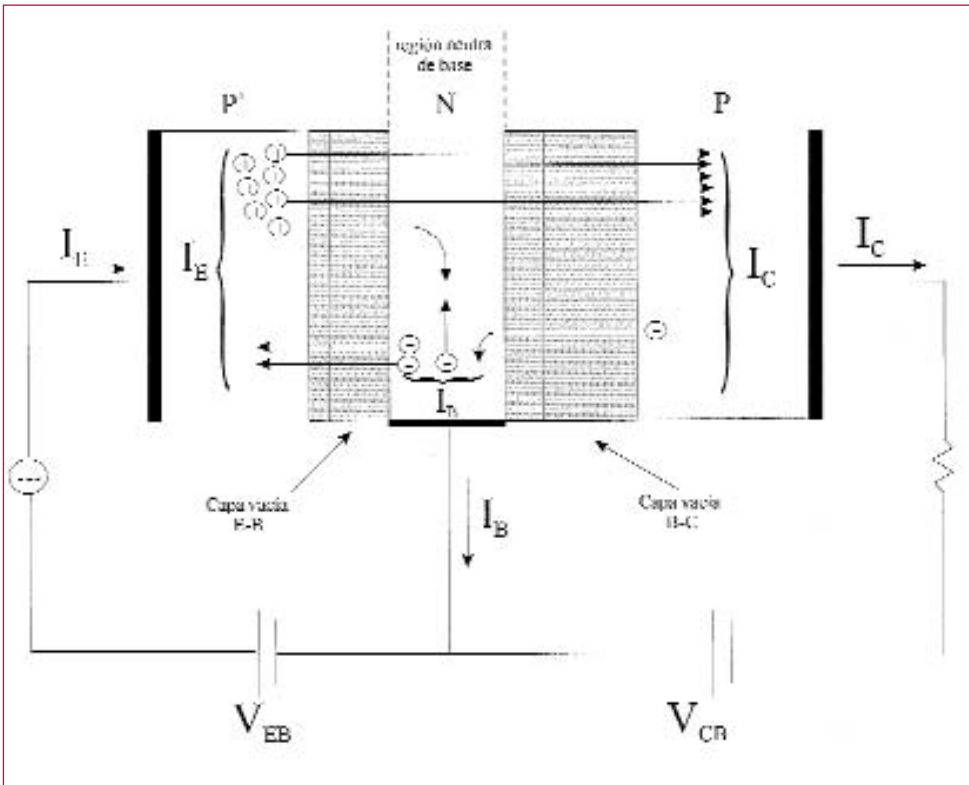


Figura 4. Flujo de portadores nun transistor bipolar (rexión activa directa).

díxer, electróns desde o colector e ocos desde a base. O primeiro destes fluxos é realmente pequeno; sen embargo, respecto do segundo, dada a estreiteza da rexión de base, os ocos inxectados desde o emisor difúndense nela sen a penas recombinación e son recollidos case na súa totalidade polo colector. Isto orixina unha corrente no colector que depende exponencialmente da tensión  $V_{EB}$ .

Os tres compoñentes que orixinan a corrente de base na rexión activa

débense á inxección de electróns cara ó emisor, como corresponde á unión  $p^n$  polarizada en directa, á chegada de electróns para a recombinación cos ocos na rexión neutra de base e á extracción de minoritarios desde o colector. Sen embargo, o valor da corrente asociada a estes fluxos de portadores é pequeno comparado coas correntes de emisor e de colector.

A posibilidade de obter unha gran ganancia en corrente para o dispositivo en emisor común débese ó feito de que



unha pequena corrente de base forza unha polarización directa da unión emisor-base, o que orixina unha grande inxección de ocos desde o emisor que son recollidos polo colector, dando lugar á aparición dunha corrente no colector moi superior á da base; aparece así unha ganancia en corrente  $\beta = I_C/I_B$  elevada.

Os primeiros transistores bipolares aparecen no mercado en 1952. Pero non é ata 1954 cando Ebers-Moll e Giacoletto realizan dous traballos teóricos básicos para a comprensión do funcionamento do transistor bipolar. O primeiro deles formula as ecuacións

das características tensión-corrente en continua e o segundo achega o modelo híbrido para pequeno sinal, que representa o seu comportamento como elemento de circuíto. A figura 5 ilustra o modelo de Ebers-Moll;  $\alpha_F$  e  $\alpha_R$  representan ganancias en corrente en directa e inversa respectivamente. Nese mesmo ano, Kroemer propón modifica-lo transistor de unión introducindo un campo na base mediante a súa impurificación de forma gradual; xorde así o transistor de deriva. Aínda que o transistor bipolar está sendo desprazado nas aplicacións por outros dispositivos, encheu unha época moi

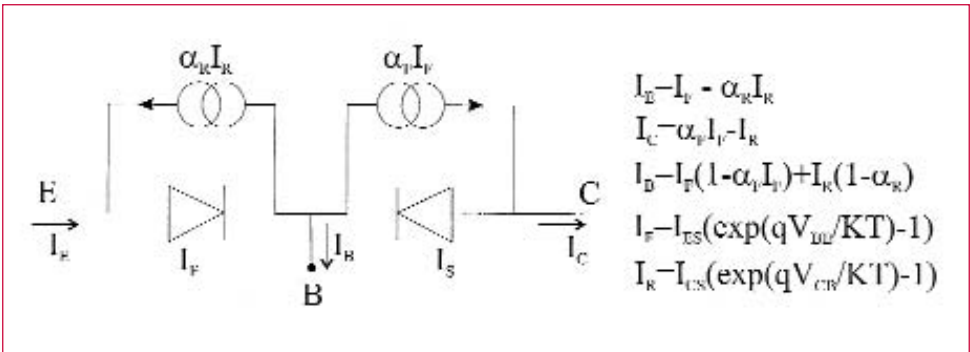


Figura 5. Modelo de Ebers-Moll do transistor bipolar.

importante da electrónica dos semicondutores.

En 1952, Shockley descobre o transistor de efecto campo de unión (JFET). Trátase dun dispositivo unipolar; é dicir, involucra un só tipo de portador nos seus procesos de transporte e o seu principio de funcionamento é o

control por un campo externo da conductividade dunha canle de carga móbil que enlaza dous electrodos coa polarización adecuada para facilita-lo transporte de portadores pola canle. No JFET, a canle créase mediante dúas unións *pn* polarizadas en sentido inverso. O uso do transistor JFET é moi

limitado na actualidade. Sen embargo, un transistor con funcionamento equivalente ó deste, o MESFET, proposto inicialmente por Mead en 1966, e executado sobre arseniuro de galio (GaAs) úsase frecuentemente en aplicacións de moi alta frecuencia. Neste tipo de transistor úsase unha unión metal-semiconductor para delimita-la anchura da canle.

Nos anos cincuenta desenvólense tamén outros dispositivos. Así, en 1956 Moll propón estruturas de catro capas (*pnpn*), base dos dispositivos semicondutores para o control de potencia (tiristores e triacs). En 1958 aparece o díodo túnel, dispositivo tipicamente cuántico, e os díodos Zéner e de avalancha. Por outra parte, coa aparición ese mesmo ano do láser, refórzase unha nova rama da Electrónica: a Electrónica cuántica. En 1960, J. A. Hoerni describe un transistor planar no que tanto as rexións de base como de emisor se difunden a través de ventás abertas nunha capa de óxido ( $\text{SiO}_2$ ) xerada na superficie do semiconductor. Desta forma, as rexións de base e emisor terminan na dita superficie. O contacto de colector tamén se pode realizar nela. É a orixe da tecnoloxía planar, que posteriormente permitirá producir unha gran cantidade de circuítos simultaneamente sobre unha oblea circular de silicio.

Na década dos sesenta danse tres importantes avances na Electrónica: pásase da tecnoloxía do xermanio á do silicio, desenvólense os dispositivos

de efecto campo e nacen e desenvólense os circuítos integrados.

### 3.2 O TRANSISTOR MOS

En 1960, Kahny e Atalla, dos laboratorios da Bell Telephone, propoñen a estrutura MOS (Metal-Oxido-Semiconductor) como realización dun novo tipo de transistor de efecto campo. A súa principal característica é ser un dispositivo superficial, no que os procesos relevantes ocorren na superficie do semiconductor, en contraposición cos BJT e JFET, baseados en fenómenos de volume. O efecto amplificador do novo transistor, o mesmo có do JFET, susténtase tamén no control da conductividade, neste caso superficial, que conecta os terminais de drenador e fonte mediante o campo eléctrico transversal creado polo potencial aplicado ó terminal de porta. Este terminal está illado electricamente da fonte e o drenador por unha capa de dióxido de Si.

Así e todo, mesmo estando a idea ben establecida, a obtención de transistores MOS fiables non foi posible ata que se coñeceron completamente as características da capa de óxido e da interfase óxido-semiconductor. Isto posibilitou introducir no proceso de fabricación distintos procesos de estabilización que minimizaron os efectos dos ións alcalinos ou das cargas fixas existentes no óxido, así como os dos estados superficiais.

En función da polaridade da canle podemos distinguir dous tipos de transistor MOS: de canle *n* e de canle *p*. A

figura 6 mostra a estrutura dun transistor de canle  $n$  de realce. Nela podemos observa-la existencia dunha canle de lonxitude  $L$  e anchura  $W$  que conecta os terminais de fonte (S) e drenador (D). Nesta estrutura de realce a canle créase mediante a aplicación dun potencial  $V_G$  ó electrodo de porta (G) superior a un determinado valor  $V_T$  coñecido como tensión limiar; esta depen-

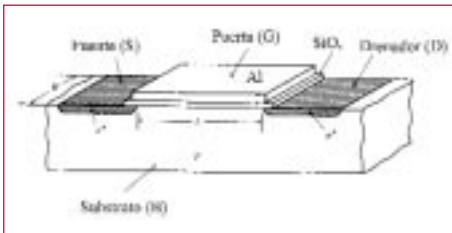


Figura 6. Estructura dun transistor MOS canle  $n$  de realce.

de das características da capa de óxido, do semiconductor e do potencial  $V_B$  aplicado ó electrodo de substrato (B).

A aplicación dun potencial axeitado ó terminal de drenador respecto do potencial de fonte orixina a aparición dun fluxo de electróns na canle, o que dará lugar a unha corrente de drenador. Nestes transistores distínguense tres rexións de funcionamento: corte, tríodo e saturación. A primeira delas ocorre cando a tensión de porta non alcanza o valor requirido para xerar canle. Na rexión tríodo existe xa unha canle que conecta a rexión de fonte coa de drenador. A rexión de saturación acádase cando esta canle se estrangula. A figura 7 ilustra esta situación.

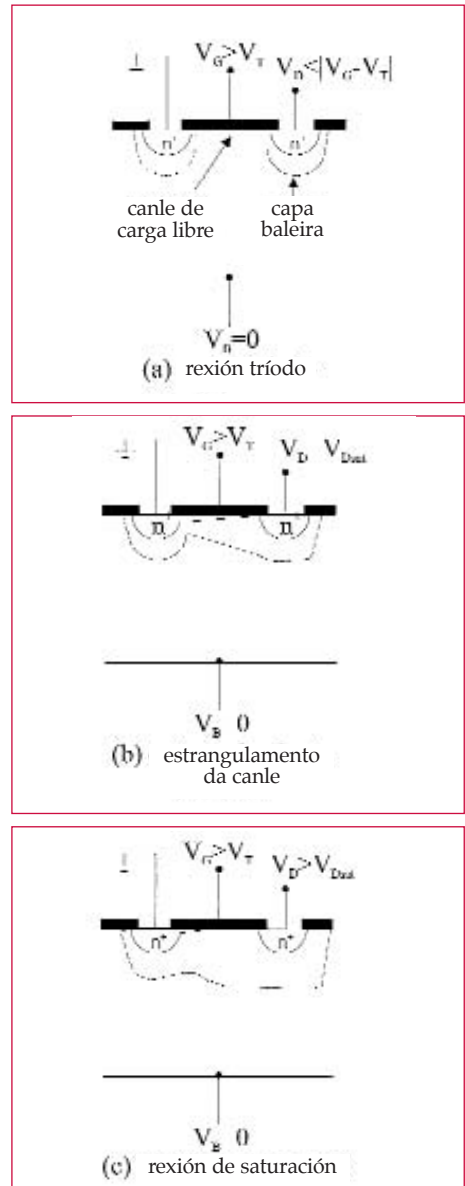


Figura 7. Transistores MOS operando en rexión tríodo (a), inicio da saturación (b) e rexión de saturación (c).

A corrente de drenador en cada situación de polarización dependerá da densidade de carga libre na canle, controlada tanto por  $V_D$  como por  $V_G$  e  $V_B$ . Distintas aproximacións para a estima-

ción da carga libre na canle conduciran a distintas expresións da corrente  $I_D$ . A máis sinxela de todas é a coñecida como lei do cadrado, que indicamos a continuación.

Tensións aplicadas	Estado do transistor	Corrente de drenador
$V_{GS} < V_T$	Rexión de corte	$I_D = 0$
$V_{GS} > V_T$ $V_{DS} < V_{DS,sat}$	Rexión triodo	$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$
$V_{GS} > V_T$ $V_{DS} > V_{DS,sat}$	Rexión de saturación	$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$

A condición de saturación alcánzase cando  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ , sendo  $V_T$

$$V_T = V_{T0} + \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{C_{ox}} \left( \sqrt{2\phi_f + \bar{V}_{ms}} - \sqrt{2\phi_f} \right)$$

con  $V_{SB}$  a tensión de polarización do substrato,  $q$  a carga do electrón,  $\epsilon_s$  a permitividade dieléctrica e  $V_{T0}$ ,  $\mu_n$ ,  $C_{ox}$ ,  $N_A$  e  $\phi_f$  parámetros asociados á estrutura implementada.

### 3.3 OS PRIMEIROS CIRCUÍTO INTEGRADOS

As décadas dos sesenta e setenta caracterízanse polo desenvolvemento da tecnoloxía integrada, de maior alcance cá propia invención do transistor. Este substituíu as funcións de circuíto das válvulas, pero os circuíto integrados son a base dunha nova filosofía de deseño.

O concepto de circuíto integrado (CI), inventado independentemente por Tack Kilby en Texas Instruments e

por Robert Noyce en Fairchild Semiconductor, facía posible a fabricación de circuíto formados por gran cantidade de transistores, coas súas resistencias e condensadores asociados, nun único substrato. Esta tecnoloxía foi producindo circuíto e sistemas electrónicos cada vez máis complexos sobre un monocristal de silicio. Os elementos discretos (transistores, díodos, resistencias e condensadores) substitúense por áreas funcionais equivalentes. Estas áreas amplificadoras, rectificadoras, resistivas ou almacenadoras de carga conéctanse directa e inseparablemente e permiten obter sobre o cristal ou óxido substrato a realización do circuíto discreto equivalente. O éxito comercial destes circuíto débese á posibilidade de automatiza-lo proceso de produción.

Podemos clasifica-los circuíto integrados segundo o campo de aplicación (dixitais ou analóxicos), a tecnoloxía soporte (bipolar, MOS ou

CMOS) e o grao de integración: pequena (SSI, 100 dispositivos por *chip*), mediana (MSI, 1000 dispositivos), grande escala (LSI, 10.000 dispositivos) ou escala moi grande (VLSI, máis de 100.000 dispositivos)

A forma repetitiva e o carácter binario dos circuitos lóxicos fíxoos especialmente cómodos á tecnoloxía integrada. Así, nesta década van aparecendo as primeiras series de familias lóxicas bipolares (Lóxica Transistor Transistor, TTL; Lóxica de Emisores acoplados, ECL), MOS e CMOS. Trátase dunha serie de circuitos dixitais que responden a unha escala de integración pequena ou mediana. Desde entón fóronse introducindo variantes e melloras encamiñadas a aumentala velocidade de funcionamento e diminuí-lo consumo. Por outra parte, os circuitos analóxicos son máis complexos e o primeiro que alcanzou perfección comparable ós dixitais foi o amplificador operacional. A introducción por Fairchild Semiconductor do circuito  $\mu$ A741 a moi baixo custo popularizou a utilización deste tipo de compoñentes analóxicos.

Unha constante na evolución da tecnoloxía integrada son os avances na miniaturización, fiabilidade, velocidade de operación e redución de custo dos circuitos integrados. Unha calculadora dixital realizada en 1965 con tecnoloxía bipolar necesitaba 150 CI con 100 compoñentes cada un. En 1969, a mesma calculadora realizábase con 4 CI en tecnoloxía MOS e en 1971 cun só CI, tecnoloxía MOS tamén. Iníciase así

a etapa de integración en grande escala, que produce sobre un monocristal subsistemas electrónicos con miles de compoñentes. As primeiras realizacións desta etapa foron os rexistros de desprazamento de 1000 bits e as memorias MOS. A tecnoloxía dominante na integración a grande escala é a CMOS.

#### 4. O MICROPROCESADOR NO DESEÑO DE SISTEMAS DIXITAIS

---

Un expoñente da integración a grande escala (LSI) é o microprocesador. A súa aparición en 1971 supón un novo fito na historia dos circuitos integrados. Trátase do circuito I4004 de Intel, que implementa a unidade central dun procesador. Este circuito posuía un bus interno de só 4 bits. Pouco despois apareceron os microprocesadores de 8 bits, entre os que podemos destaca-lo I8080 ou o M6800 de Motorola, e que podemos considerar como a primeira xeración de microprocesadores.

Un microprocesador non é máis que a unidade central de procesamento (CPU) dun ordenador. Por conseguinte, para poder implementar un sistema baseado en microprocesadores hai que incluír toda outra serie de elementos, tales como as memorias, RAM e ROM, ou os adaptadores de periféricos, síncronos ou asíncronos. A construción dun sistema microprocesador implica pois a conexión de 6 ou máis CI complexos. Sen embargo, unha gran

novidade que achegan os microprocesadores é a programación, o que implica dispoñer do *software* necesario para o desenvolvemento de aplicacións: linguaxes ensamblador, compiladores, etc. Xorden así os sistemas de desenvolvemento.

A aparición dos microprocesadores orixina unha grande evolución do deseño electrónico dixital. O avance das tecnoloxías e das capacidades de integración permite integrar parte dos periféricos no CI principal, incrementalo tamaño do bus, a frecuencia de operación, etc. Este desenvolvemento leva á sucesiva aparición de seguintes xeracións de microprocesadores, cada vez máis evolucionados. Cabería citar aquí como exemplos que marcan un fito no desenvolvemento o 68000 de Motorola, o 80386 de Intel. Os microprocesadores continúan en evolución permanente e proba disto é a posibilidade de obter ordenadores persoais cada vez máis potentes.

## 5. INTEGRACIÓN VLSI. CIRCUÍTOS DIXITAIS, MIXTOS E MICROSISTEMAS

Inicialmente o deseño dos circuítos integrados realizábase no ámbito da industria dos semicondutores; fabricábanse en grandes cantidades e vendíanse como produtos estándar. Sen embargo, a aparición das técnicas de deseño con bloques funcionais e as ferramentas CAD introducen un cambio importante, facilitando o deseño de circuítos de aplicacións específicas (das

súas iniciais en inglés, ASIC) por persoas alleas a esa industria. Un feito importante que hai que considerar é a publicación en 1980 por parte de Mead e Conway do libro titulado *Introduction to VLSI systems*, que introduciu no ámbito académico universitario o deseño de CI.

Un aspecto no deseño dos CI é o seu custe económico. Nos de produción estándar, o custo do desenvolvemento do *chip* é elevado, pero compénsase coa produción de grandes cantidades, o que abarata o produto final. No caso dos ASIC, o custo é un aspecto importante debido ó número relativamente pequeno de unidades que se producen. Polo tanto, os ASIC só se volven económicos cando se reducen os gastos de desenvolvemento mediante a introdución de novos métodos de deseño e o uso de ferramentas CAD. Por outra parte, para facilitar que institucións con orzamentos moi elevados, tales como as universidades, poidan acceder ó deseño de CI, xorde o concepto de *Multi-Project Chip*, que permite integrar deseños de distintas institucións nunha mesma oblea. Pódense realizar así circuítos en cantidades moi reducidas, facendo posible o acceso ó Si por parte das universidades a un custo reducido. Tamén é importante a contribución do proxecto EUROCHIP, lanzado polo Terceiro Programa Marco da Comunidade Europea en 1989, pois permite que as universidades dispoñan dun conxunto de ferramentas de deseño e simulación a moi baixo custo.

Á hora de deseñar circuítos que resolvan tarefas complexas aparecen distintas opcións: pódese elixir o uso de dispositivos lóxicos programables (PLD), que son circuítos de produción estándar programables polo usuario, tales como os *arrays* de portas programables (PLA) ou as redes de portas programables por campo (FPGA) introducidas na década dos noventa, ou ben optar por solucións ASIC.

A posibilidade de implementar ASIC nun espacio curto de tempo débese ó uso dunha metodoloxía de deseño xerárquica, que inclúe distintos pasos que abranguen desde as especificacións funcionais ata o produto final. Para a súa execución, o deseñador dispón de bloques funcionais, que non son máis que un conxunto de celas básicas que constitúen elementos de circuítos de uso común: portas lóxicas, biestables ou bloques máis complexos, a partir dos cales é posible construír tódalas funcións dixitais. Os datos das celas predeseñadas están contidas nunha librería de celas que inclúe o sistema CAD. Este contorno de traballo facilita a tarefa de conecta-las celas para implementa-lo circuítos, simular para comprobar se se cumpren as especificacións de deseño, determina-la súa disposición sobre o plano do chip (*layout*) e xera-lo ficheiro que conterá os datos que describen o circuítos e que se debe enviar á fundición para obter finalmente o chip.

Tamén é posible aborda-lo deseño do ASIC con elementos simples, o que proporcionará deseños máis optimiza-

dos á custa dun maior esforzo e tempo. Neste caso o fabricante de semicondutores proporciona os parámetros eléctricos e as regras de deseño para a disposición dos compoñentes correspondentes ó proceso tecnolóxico usado. Temos que sinalar aquí a importancia que a simulación a nivel de circuítos ten en todos estes procesos e que proporciona o programa SPICE. Este empezouse a desenvolver no ano 1971 na Universidade de Berkeley, e foron aparecendo sucesivamente versións melloradas. Por outra parte, no deseño de ASIC é de crucial importancia a fase de test, que debe ser incluída xa na propia fase de deseño. Tamén constitúe unha axuda importante o uso de sistemas de síntese automática.

Ó longo de todos estes anos foise incrementando a complexidade dos circuítos integrados, tanto pola redución do tamaño dos transistores individuais como polo aumento do tamaño máximo de chip que se pode fabricar de forma económica. Xa en 1964, G. Moore —que máis tarde se converteu nun dos fundadores da empresa Intel Corporation— prediciu un incremento logarítmico anual da complexidade; este continuou desde entón, aínda que cunha pendente menos pronunciada que nos primeiros anos. Así, os transistores MOS pasaron de ter lonxitudes de canle de decenas de micras a lonxitudes inferiores á micra (existen actualmente tecnoloxías comerciais de 0.25 micras), ou a área de chip, que foi aumentando desde tamaños de 1 mm<sup>2</sup> a dimensións que se aproximan a varios cm<sup>2</sup>. A evolución tamén foi

constante no relativo á frecuencia de traballo e á diminución da potencia disipada, cunha redución paulatina nas tensións de alimentación. Este ritmo de crecemento tamén se prevé para o futuro. Segundo unha táboa titulada *SIA roadmap*, publicada en 1994 pola Asociación de Fabricantes de Semicondutores (SIA) nos Estados Unidos e revisada en 1997, que marca a evolución prevista da industria ata o ano 2012, espérase obter un circuíto integrado en ultra alta escala de integración (ULSI) de cen millóns de transistores no ano 2003.

O ritmo de crecemento tecnolóxico permite que na actualidade se poidan integrar sobre un mesmo substrato circuítos e compoñentess ben distintos. Este é o caso dos circuítos mixtos analóxicos e dixitais, que inclúen dentro dun mesmo substrato unha aplicación completa, con parte analóxica e dixital. Isto orixinou un renacemento do deseño analóxico, limitado nos anos oitenta ó deseño de amplificadores operacionais, filtros e conversores A/D e D/A, fundamentalmente sobre tecnoloxías nMOS e CMOS. Como consecuencia destes avances aparecen novas técnicas de deseño (circuítos de capacidade conmutada, deseños en modo corrente, etc.) de grande importancia no trazado da parte analóxica dos circuítos mixtos. Nesta categoría de circuítos mixtos hai que incluír tamén os microsistemas, que conteñen no mesmo substrato sensores e actuadores, que poden ser térmicos, ópticos, mecánicos, etc., e constitúen o que se denomina un sistema completo no *chip*.

Como puidemos observar nestas liñas, unha constante na evolución da electrónica é a implementación de circuítos cada vez máis complexos mediante o desenvolvemento de novas tecnoloxías que permiten unha maior miniaturización dos dispositivos. Os logros acadados fixeron que a electrónica se introducira en tódolos sectores da actividade humana, creando ó seu redor unha das industrias máis importantes do mundo. Esta evolución seguirá nun futuro. A aparición das nanotecnoloxías e a conmutación molecular xeran novos retos.

## 6. OPTOELECTRÓNICA

---

Da mesma forma que a invención do transistor, a finais da década dos anos corenta, marcou o inicio da era da Electrónica, o desenvolvemento case simultáneo, nos anos sesenta, da fibra óptica e do láser de semicondutores iniciou a era da Fotónica. Dentro deste contexto, a Optoelectrónica podería definirse como a conxunción da Electrónica e da Fotónica, baseada na manipulación de electróns e fotóns, para a súa aplicación a distintos sectores da produción a través da enxeñaría. Isto converteuna nun elemento de capital importancia no desenvolvemento tecnolóxico da sociedade de hoxe en día.

A Optoelectrónica é, pois, un dominio aplicado que asenta sobre o coñecemento xerado e establecido nas ciencias básicas e que pon a énfase nos dispositivos que incorporan interfaces



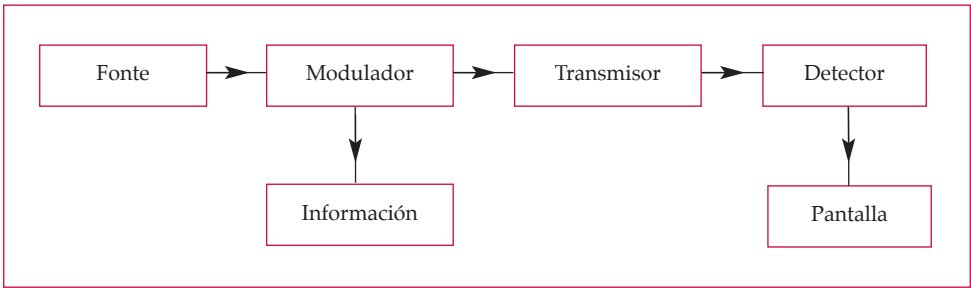


Figura 8. Diagrama de bloques dun sistema optoelectrónico.

para a conversión de sinais eléctricos en ópticas e viceversa, e nos sistemas que conforman estes dispositivos.

A figura 8 amosa os dispositivos que integran un sistema optoelectrónico típico. A fonte é o xerador de luz que serve como onda portadora de información e a súa función fundamental é converter enerxía eléctrica en luz cunha eficiencia abonda que nos permita axustala ó transmisor. Os díodos emisores de luz (LED) e os láseres de semicondutores (LDs) son as fontes utilizadas nun sistema optoelectrónico. Un LED é unha unión p-n con polarización directa, que inxecta portadores nunha zona activa arredor da unión, producíndose luz por emisión espontánea debido á recombinación dos electróns da banda de condución cos ocos da banda de valencia. Un LD é un LED cunha cavidade óptica que produce realimentación e xera emisión estimulada de radiación nunha banda espectral máis estreita cá da luz emitida por un díodo. Os moduladores son dispositivos rápidos que operan a escala de tempos de micro a nanosegundos, por medio dos cales se rexistra a informa-

ción na luz por modificación analóxica ou dixital dalgunha das súas características: amplitude, fase, polarización, frecuencia, etc. A modulación obtense por aplicación externa de campos eléctricos, magnéticos ou ondas acústicas que afectan as propiedades físicas do medio a través do cal se propaga a luz. A gran vantaxe dos moduladores é o seu reducido tamaño e a súa capacidade para seren integrados monoliticamente coas fontes de luz nun sistema optoelectrónico.

A onda portadora de información propágase ó longo dunha canle de transmisión que é a fibra óptica. Esta é un medio confinador de luz cunha estrutura de índice de refracción que pode ser de escalón (homoxénea) ou de gradiente de índice (inhomoxénea) e permite, segundo sexa o diámetro da fibra, a existencia dun ou máis posibles modos de propagación. O material principal utilizado na fabricación de fibras ópticas, para transmisión de información, é sílice puro ou dopado; tamén se fabrican fibras ópticas de vidros multicomponentes ou de sílice/silicona. O uso de fibras monomo-

do ou multimodo depende das presentacións do sistema. Nunha fibra monomodo, que ten a característica esencial de que se propaga un modo, non existe dispersión intermodal e isto ten importancia considerable na transmisión de información a longa distancia.

Despois da viaxe (que pode ser longa) da portadora óptica a través da canle de transmisión, a información ha ser detectada e transducida do dominio fotónico ó eléctrico. Disto dedúcese que, independentemente da tecnoloxía en que se basee o sistema, ó final, sempre se xera a necesidade de detectalo sinal óptico e tratar, convenientemente, o sinal eléctrico resultante. É dicir, necesítanse dispositivos optoelectrónicos coñecidos como fotodetectores. Estes dispositivos están compostos por materiais fotoconducivos (díodos pn, pin ou de avalancha/APD) que teñen por misión converte-lo sinal fotónico en eléctrico, con tempos de resposta entre micro e picosegundos. Así, mediante unha polarización inversa do material fotoconducivo, os electróns liberados pola absorción de fotóns xeran unha corrente eléctrica proporcional á potencia óptica detectada. A importancia do fotodetector é obvia xa que determina cómo o sistema realiza a súa tarefa, establecendo o nexo de unión co mundo exterior a través da pantalla, interface entre maquina e ser humano. A interacción maquina/pantalla é adoito electrónica, mentres que a interacción pantalla/humano é visual (figura 9), por iso esta ha reunir características de lexibilidade para unha lec-

tura rápida e precisa dos datos, brillo adecuado para unha boa percepción visual e alto contraste para unha optimización da agudeza visual.

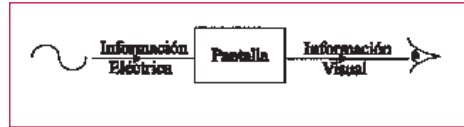


Figura 9. Interacción sistema/observador.

Por outra parte, o progreso da Optoelectrónica vai unido inexorablemente á investigación sobre novos materiais, que se desenvolve en física do estado sólido e que fixo posible novas formas de xeración, modulación, transmisión e detección de luz. En particular, a Optoelectrónica creceu rapidamente, a partir da década dos sesenta e principios dos setenta, co desenvolvemento da fibra óptica de cuarzo de baixo custo, seguido polo láser de semiconductores de dobre heteroestructura que facilitaba a emisión de luz a temperatura ambiente. Estes primeiros avances, xunta outros posteriores, como os láseres de cavidade vertical, as fibras ópticas dopadas con terras raras, os *arrays* de fotodíodos e as pantallas activas de semiconductores, por sinalar algúns exemplos, levaron a unha intensa e fructífera actividade en I+D sobre as aplicacións da Optoelectrónica. Entre elas, podemos cita-los sensores ópticos que permiten medir unha ampla gama de magnitudes físicas e químicas para medio ambiente e procesos de control, as comunicacións de banda ancha para longa distancia, o procesado de información para

computación óptica ou os discos compactos para memorias ópticas.

A outro nivel, e para rematar, un dos métodos máis efectivos para coñecer-lo estado dun determinado campo da tecnoloxía, así como para prever cales van se-los camiños que percorra no futuro, consiste en establece-la evolución do seu mercado de vendas. Neste sentido, o mercado da Optoelectrónica acadou aproximadamente 50 billóns de dólares USA en 1994 e prevese que ascenda a 200 billóns dentro de dez anos. Se a estes datos agregamos que, por exemplo, o mercado mundial de vendas de cable de fibra óptica foi de 5.7 billóns de dólares en 1994, que supuxo 6 millóns de quilómetros de cable terrestre e submariño instalado, que chegou a 14.5 billóns en 1999 (12 millóns de quilómetros de cable instalado) e que en 1995 se venderon máis de 50 millóns de láseres de semicondutores, podemos facernos unha idea da importancia que ten a Optoelectrónica no mercado de vendas de produtos tecnolóxicos. Para o futuro, e como mostra, baste dicir que en Xapón se estimou que para o ano 2010 a Optoelectrónica representará o 20 % do seu PIB.

## BIBLIOGRAFÍA

- Baker, R. J., e outros, *CMOS: Circuit Design, Layout and Simulation*, IEEE Press, 1998.
- Bardeen, J., e W. H. Bratain, "The Transistor, a Semiconductor Triode", *Phys. Rev.*, 74, 230, 1948.
- Bracho, S., *La Ingeniería Microelectrónica ante el cambio del Milenio*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1999.
- Desmond Smith, S., *Optoelectronic Devices*, Nova York, Prentice-Hall, 1995.
- Gray, P. R., e outros, *Analog MOS integrated Circuits*, Nova York, IEEE Press, 1980.
- Gray, P. R., e R. G. Meyer, *Analysis and design of Analog Integrated Circuits*, Nova York, John Wiley and Sons, 1977. (Terceira edición en 1993).
- Grebene, A. B., *Bipolar and MOS Analog Integrated Circuits Designs*, Nova York, John Wiley and Sons, 1984.
- Hodges, D. A., e Jackson, *Analysis and Design of Digital Integrated Circuits*, Nova York, McGraw-Hill, 1983.
- Ismail, M., e T. Fiez, *Analog VLSI. Signal and Information Processing*, Nova York, McGraw-Hill, 1994.
- Iway, H., "CMOS Technology-Year 2010 and Beyon", *IEEE Journal of solid state circuits*, vol. 34, 3, 1999, 357-366.
- Mead, C., e C. A. Conway, *Introduction to VLSI systems*, Addison Wesley, 1980.
- Moore, G. E., "Microprocessor and integrated electronic technology",

*Proceedings of the IEEE*, vol. 64, 6, 1976, 837-841.

Naish, P., e P. Bishop, *Designing ASICs*, Ellis Horwood, 1988.

Nicollian, F. H., e J. R. Brews, *MOS Physics and Technology*, Nova York, John Wiley and Sons, 1982.

*Proceedings of the IEEE. Special Issue: 50<sup>th</sup> Anniversary of the Transistor*, vol. 86, 1, xaneiro, 1998.

*Proceedings of the IEEE. Special Issue: Integrated Sensors, Microactuators & Microsystems*, vol. 86, 8, agosto, 1998.

Shockley, W., "The theory of  $p$ - $n$  Junctions in Semiconductors and  $p$ - $n$  Junctions Transistors", *Bell. Syst. Tech. J.*, 28, 435, 1949.

Tsividis, Y. P., *Operation and Modelling of the MOS transistor*, Nova York, McGraw-Hill, 1987.

Uiga, E., *Optoelectronics*, Nova York, Prentice-Hall, 1995.

Wood, D., *Optoelectronic Semiconductor Devices*, Nova York, Prentice-Hall, 1994.

