

# EL3004-Circuitos Electrónicos Analógicos

## Clase No. 1: Introducción

Marcos Diaz

Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE)  
Universidad de Chile

28 de julio de 2009

### 1 Motivación e Historia

### 2 Conducta cuántica de ondas y partículas

- Radiación de cuerpo negro
- El efecto fotoeléctrico
- El átomo de Bohr

### 3 Dualidad Onda Partícula

### 4 Paquetes de onda: velocidades de fase y grupo de las partículas

## Capítulo I Introducción



## Un poco de historia



(a)



(b)

**Figura:** (a) Bardeen, Shockley, y Brattain en los laboratorios Bell. Brattain y Bardeen inventaron el BJT en 1947. (b) El primer BJT de germanio. En nuestros días electrónica es responsable (aprox.) del 10 % del PIB del mundo.

## Un poco de historia

|           |                                                                             |      |                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------|
| 1874      | Braun inventa el rectificador de estado sólido                              | 1963 | Se forma la IEEE de IRE y AIEE.                      |
| 1906      | DeForest inventa el tubo de triodo de vacío.                                | 1968 | Primer OpAmp comercial.                              |
| 1907-1927 | Primer circuito de radio desarrollado de diodos y triodos.                  | 1970 | Dennard inventa la célula de transistor DRAM en IBM. |
| 1925      | Lilienfeld patenta el dispositivo de efecto de campo.                       | 1971 | Aparece el microprocesador Intel 4004.               |
| 1947      | Bardeen y Brattain inventan el transistor bipolar en los laboratorios Bell. | 1974 | Aparece el microprocesador 8080.                     |
| 1952      | En Texas Instruments comienza la producción comercial de BJTs               | 1978 | Primera memoria comercial de 1-kilobit.              |
| 1956      | Bardeen, Brattain y Shockley reciben el Premio Nobel.                       | 1984 | Aparece el chip de memoria de Megabit.               |
| 1958      | El circuito integrado (IC) es desarrollado por Kilby y Noyce.               | 2000 | Alferov, Kilby, y Kromer comparten el premio Nobel.  |
| 1961      | Aparece el primer IC comercial (Fairchild semiconductor).                   |      |                                                      |

## Un poco de historia

- El circuito integrado fue inventado en 1958.
- La producción mundial de transistores se ha doblado cada año, en los últimos 20 años.
- Cada año, se producen más transistores que en todos los años anteriores combinados.
- Aproximadamente  $10^{18}$  transistores fueron producidos en el año 2002.
- Hay aproximadamente 50 transistores por cada hormiga del mundo.

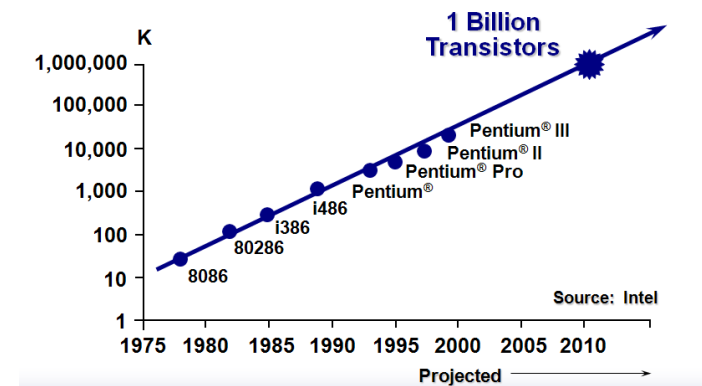
**Fuente:** Presentación de Gordon Moore en la Conferencia International de Circuitos de Estado Sólido del año 2003.

## Un poco de historia



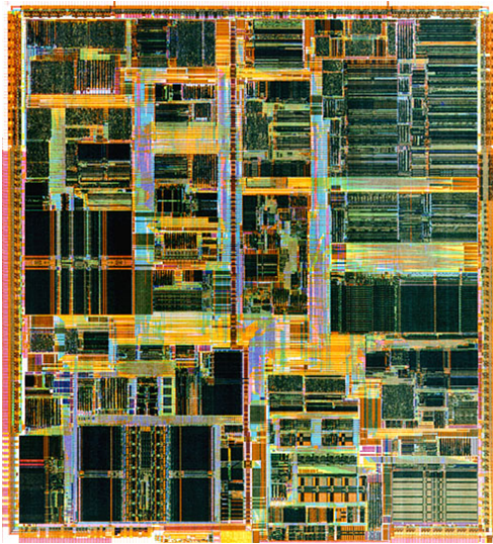
**Arriba-Iz:** Tubos de vacío, **Arriba-Der:** Transistores discretos, **Abajo-Iz:** Circuitos integrados de pequeña (SSI) y mediana escala (MSI) y **Abajo-Der:** Circuitos integrados de gran escala (VLSI).

## Un poco de historia



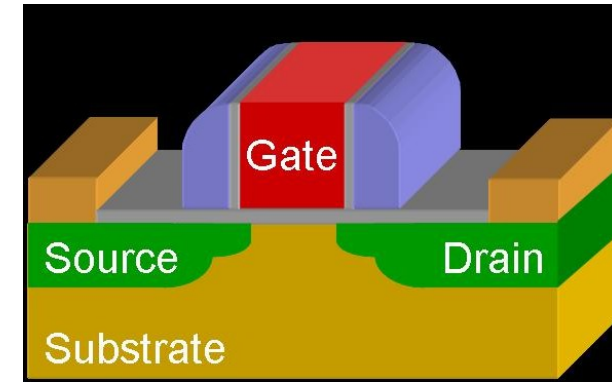
# Un poco de historia

Procesador Pentium IV de Intel



# Capítulo II

Física de Semiconductores



## Mecánica Clásica

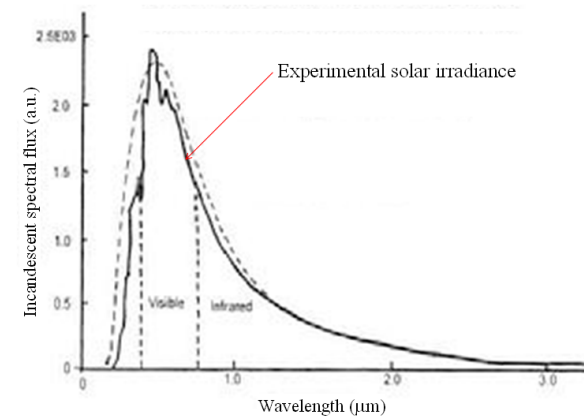
La mecánica clásica se basa en leyes desarrolladas por Newton, por ejemplo:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathcal{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{\partial \mathcal{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathcal{D}(\mathbf{r}, t) &= \rho(\mathbf{r}, t) \\ \nabla \times \mathcal{H}(\mathbf{r}, t) &= \mathcal{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathcal{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathcal{B}(\mathbf{r}, t) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

## Radiación de Cuerpo Negro

Problema de la mecánica clásica

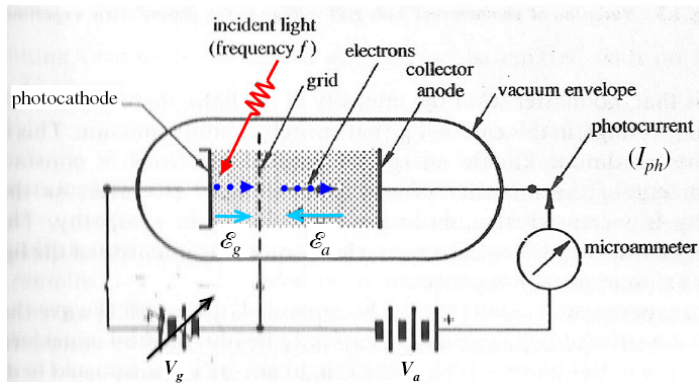


- $E = hf[\nu]$ , con  $h = 6,626 \times 10^{-34} [\text{J s}]$

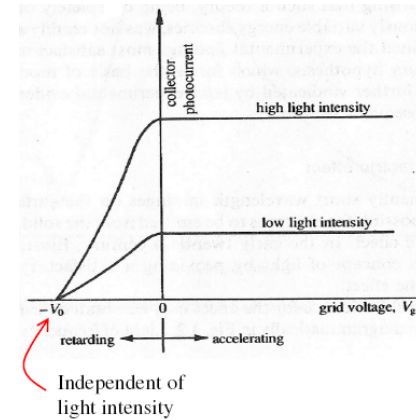
- $E = \hbar\omega[\nu]$ ,

$$0, \hbar\omega, 2\hbar\omega, 3\hbar\omega, \dots n\hbar\omega,$$

# Configuración Experimental



# Curvas Experimentales: Problema



- No hay emisión si  $f < f_0$
- $V_g = -V_0$  inhibe la emisión de  $e^-$
- $V_0$  independiente de la intensidad de la luz
- $\#e^-$  depende de la intensidad pero la energía cinética máxima es constante.

## Explicación

Energía cinética del electron emitido = Energía del foton – Función de trabajo

$$\frac{1}{2}mv^2 = hf - q\phi \quad (3)$$

Caso limite cuando un  $e^-$  es emitido sin energía cinetica,

$$f_0 = \frac{q\phi}{h} \quad (4)$$

$$qV_0 = hf - q\phi \quad (5)$$

## Espectro del átomo de Hidrogeno: Problema

Hydrogen Absorption Spectrum

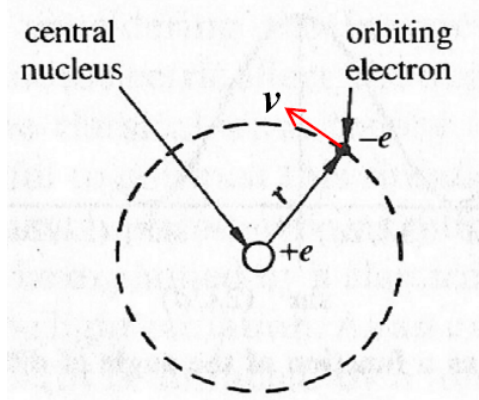


Hydrogen Emission Spectrum



From: <http://www.solarobserving.com/halpha.htm>

# Problema



$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{mv^2}{r} \quad (6)$$

$$U = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

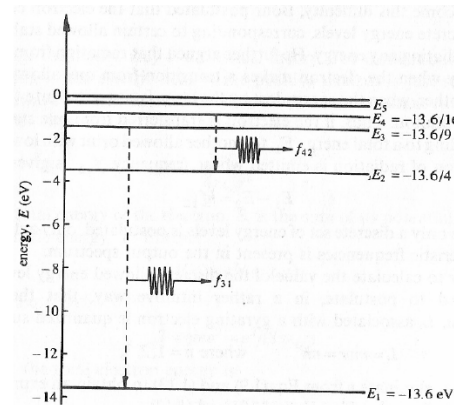
$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$E = -\frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (7)$$

$$f = -\frac{v}{2\pi r} \quad (8)$$

$$f = -\frac{q}{4\sqrt{\pi^3\epsilon_0 mr^2}} \quad (9)$$

# Explicación



Applet

$$E_1 - E_2 = hf_{12} \quad (10)$$

asumiendo que el momento angular esta cuantizado,

$$L = mvr = n\hbar \quad \text{donde } n = 1, 2, 3 \dots \quad (11)$$

$$v^2 = \frac{2q^2}{8m\pi\epsilon_0 r} = \frac{n^2\hbar}{m^2 r^2} \quad (12)$$

$$r_n = \frac{4\pi n^2 \hbar^2 \epsilon_0}{q^2 m} = \frac{n^2 \hbar \epsilon_0}{\pi q^2 m} \approx 0,05 n^2 [nm] \quad (13)$$

$$E_n = -\frac{q^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{\pi q^2 m}{n^2 \hbar^2 \epsilon_0} = -\frac{mq^4}{8\epsilon_0^2 n^2 \hbar^2} \approx -\frac{13,6}{n^2} [eV] \quad (14)$$

$$c = f\lambda \quad (15)$$

$$p = \frac{E}{c} \quad (16)$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{E}{f\lambda} = \frac{hf}{f\lambda} = \frac{h}{\lambda} \quad (21)$$

Explicación: Fuerza sobre un fotón

$$dE = \mathbf{F} d\mathbf{x} \quad (17)$$

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} \quad (18)$$

$$dE = \frac{d\mathbf{p} d\mathbf{x}}{dt} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} d\mathbf{p} = c d\mathbf{p} \quad (19)$$

$$p = \frac{E}{c} \quad (20)$$

Si  $m = 0,2[\text{kg}]$  y  $v = 10[\text{ms}^{-1}]$

Manzana

$$p = mv = 0,2 \times 10 = 2[\text{kg m s}^{-1}] \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,6 \times 10^{-34}}{2} \approx 10^{-34} [m] \quad (23)$$

Electron

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \quad (24)$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \quad (25)$$

$$p = mv = \sqrt{2qVm} \quad (26)$$

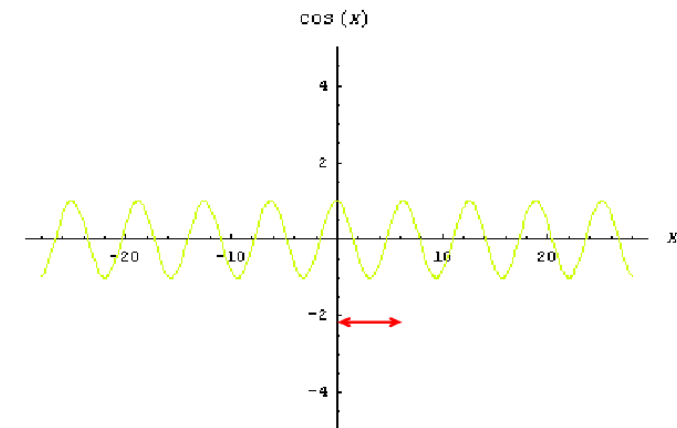
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2qVm}} = \frac{1,225}{\sqrt{V}} [nm] \quad (27)$$

Si  $V = 50[V]$ ,  $\lambda = 1,7 \times 10^{-7} [mm]$

# Interpretación de la propiedad de onda de las partículas

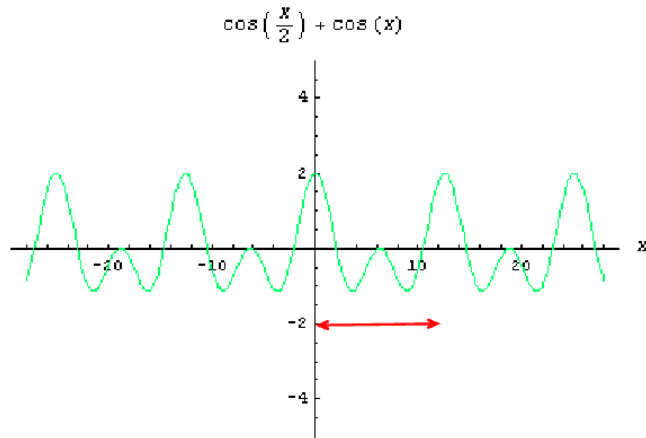
$$t = 0$$

$$n = 1$$



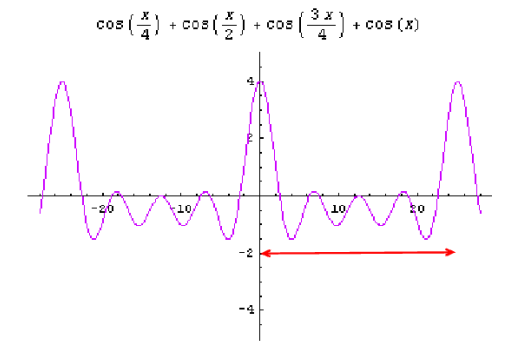
# Interpretación de la propiedad de onda de las partículas

$t = 0$   
 $n = 2$



# Interpretación de la propiedad de onda de las partículas

$t = 0$   
 $n = 4$



A wavepacket is formed when  $n \rightarrow \infty$

Wavepacket  $\equiv$  wave (superposition of waves) + particle (localization)

## Velocidad de fase

$$A_0 \cos(\omega t - \beta x) \quad (28)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (29)$$

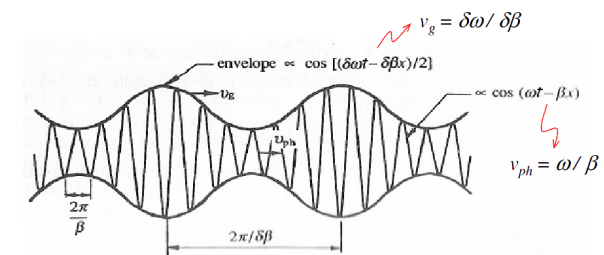
$$A_0 \operatorname{Re}\{e^{i(\omega t - \beta x)}\} \quad (30)$$

$$\omega t - \beta x = \text{Constante} \quad (31)$$

$$\omega - \beta \frac{dx}{dt} = 0 \quad (32)$$

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} \quad (33)$$

## Velocidad de grupo



$$\begin{aligned} A_0 \cos(\omega t - \beta x) &+ A_0 \cos([\omega + \delta\omega]t - [\beta + \delta\beta]x) \\ &= 2A_0 \cos\left(\frac{1}{2}([\omega + \delta\omega]t - [\beta + \delta\beta]x)\right) \cos\left(\frac{1}{2}[\delta\omega t - \delta\beta x]\right) \\ &\approx 2A_0 \cos(\omega t - \beta x) \cos\left(\frac{1}{2}[\delta\omega t - \delta\beta x]\right) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\delta\omega t - \delta\beta x = \text{Constante} \quad (35)$$

$$v_g = \frac{\omega}{\beta} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= m\mathbf{v} = \frac{h}{\lambda} \\ K &= \frac{1}{2}mv^2 = hf \end{aligned} \quad (37)$$

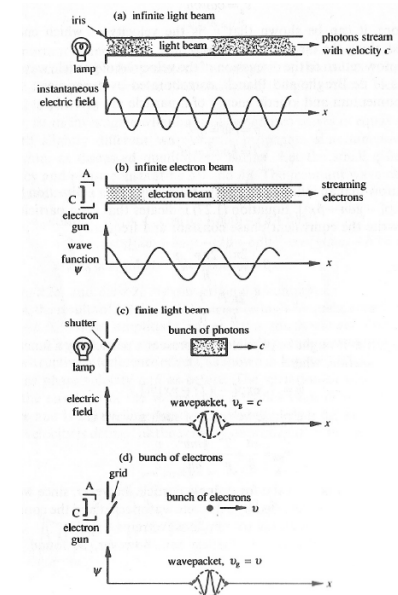
$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi p}{h} = \frac{p}{\hbar} \\ \omega &= 2\pi f = \frac{2\pi K}{h} = \frac{K}{\hbar} \end{aligned} \quad (38)$$

$$\psi = A_0 e^{-j(Kt - px)/\hbar} \quad (39)$$

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{K}{p} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{mv} = \frac{v}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial \beta} &= \frac{mv}{\hbar} \frac{\partial v}{\partial \beta} \quad \text{y} \quad \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{m}{\hbar} \frac{\partial v}{\partial \omega} \\ v_g &= \frac{\partial \omega}{\partial \beta} = v \end{aligned} \quad (40)$$

$v$ -velocidad de la partícula



## Resumen Clase #1

- Experimentos que mostraron las limitaciones de la mecánica clásica
  - Radiación de cuerpo negro
  - Efecto Fotoelectrico
  - Spectro del átomo de Hidrogeno
- Cuantización de la energía (Fotón) ( $E = n\hbar\omega$   $n = 1, 2, 3 \dots$ )
- Dualidad onda partícula
  - Una onda-partícula puede ser representada por una superposición infinita de ondas.
  - El comportamiento de onda le da una velocidad de fase (puede ser mayor que  $c$ ).
  - Como es una superposición de ondas también le da velocidad de grupo (velocidad de la información)