

A7 Apéndice al capítulo T9

Circuitos integrados mixtos

Necesidad de etapas analógicas

Los sistemas digitales, a no ser los meramente informáticos, necesitan, en algunas de sus entradas y salidas, circuitos electrónicos analógicos para relacionarse con el mundo físico, que es, básicamente, analógico. Conversores digital-analógicos o analógico-digitales, comparadores, filtros, amplificadores,... son etapas auxiliares que, muy frecuentemente, acompañan a los sistemas digitales.

Cuando se integra un sistema digital en un ASIC, dejar fuera, en la periferia, estas etapas analógicas puede suponer una limitación en cuanto a tamaño, velocidad, fiabilidad y coste. Por ello, cada vez es más frecuente integrar también la parte analógica auxiliar dentro del mismo circuito integrado, dando lugar a un circuito integrado mixto.

Un ASIC mixto es predominantemente digital (generalmente más del 90 % en cuanto a funciones o módulos), con una parte auxiliar que realiza la interfase de la parte digital con algunas entradas o salidas analógicas. A pesar de ser minoritaria, el diseño de la parte analógica suele recurrir un esfuerzo mucho mayor que el de toda la parte digital; no es extraño que, suponiendo las etapas analógicas menos del 10 % del conjunto del circuito, su diseño requiera un esfuerzo relativo superior al 90 % del total.

¿Por qué el diseño analógico es más costoso y se encuentra menos desarrollado que el diseño digital? La siguiente tabla presenta un resumen de motivos que confieren a «lo analógico» un sello de diversidad y dispersión frente a la uniformidad y regularidad de lo «digital».

<i>lo digital</i>	<i>lo analógico</i>
unos y ceros: valores extremos	valores continuos
puertas y biestables con un solo parámetro: <i>fan-out</i>	diversidad de etapas con gran número de parámetros: alimentaciones, ganancia, R_i , R_o , ancho de banda, <i>offset</i> , CMRR, ...
tres tiempos funcionales: t_p , t_s , y t_h	necesidad de estudiar su respuesta en frecuencia: polos y ceros
se aprovecha la «no estabilidad», fuera de la zona lineal: se utilizan los extremos de la alimentación	se trabaja en zona lineal y es preciso asegurar la estabilidad a través de: situación de polos y ceros, margen de fase, redes de compensación
la precisión se deriva de la utilización de dos estados diferenciados: conducción y corte	la precisión se consigue mediante técnicas de compensación: apareamiento, realimentación y componentes adicionales
hay un amplio margen para la precisión, gracias a los intervalos de cero y uno	afectan fuertemente los errores de linealidad y desplazamiento
buena inmunidad al ruido	alta sensibilidad al ruido y deriva térmica

A pesar de las dificultades derivadas de los aspectos señalados en la tabla anterior, en muchas ocasiones merece la pena insertar todo el sistema electrónico, incluidas sus etapas analógicas, en el mismo circuito integrado; en su caso, quedarán fuera las etapas de potencia, aunque va siendo viable, cada vez más, incorporar también en un ASIC etapas de media potencia.

La modulación de anchura de pulsos

Conviene tener en cuenta que las técnicas de modulación en anchura de pulso permiten reducir, en gran medida, la parte analógica de los diseños, cuando no se requieren velocidades muy altas. El manejo de la información codificada en anchura de pulso, en lugar de en amplitud, se acomoda bien a las técnicas digitales, de manera que la modulación PWM es una alternativa eficaz a procesos típicamente analógicos.

En el capítulo 18 (segundo volumen) se describen cuatro moduladores de anchura de pulso y sus aplicaciones:

- control de potencia todo/nada, en lugar de control por tensión o intensidad,
- generación de referencias de tensión y de formas de onda,
- conversión DC – DC,
- control de amplitud de señal, conformando potenciómetros digitales divisores de tensión,
- conversión digital – analógica,
- y conversión analógica – digital.

Los correspondientes circuitos PWM requieren algunos componentes analógicos, pero su control tiene una importante parte digital, en base a intervalos temporales (anchura de pulsos) que pueden ser gestionados por contadores, comparadores y otros bloques digitales. De esta forma, aunque siguen estando presentes, estas técnicas reducen mucho los componentes analógicos que se necesitan: mantener estos componentes fuera del ASIC no suele suponer una grave limitación a sus prestaciones y, en todo caso, pueden integrarse dentro con menor esfuerzo.

Componentes en las etapas analógicas

Los sistemas digitales, en tecnología CMOS, solamente requieren transistores NMOS y PMOS; ningún otro componente más. Las etapas analógicas necesitan, además, resistencias, condensadores y transistores bipolares (al menos, transistores NPN).

La integración de resistencias se hace mediante trozos alargados de regiones semiconductoras:

- en polisilicio las resistencias son de bajo valor ($< 1K$) y buena precisión ($< 10\%$),
- la difusión P^{++} permite mayores valores (hasta $10K$) con menor precisión (20%)
- y la difusión N del pozo ofrece resistencias de valores altos, con malos coeficientes de variación respecto a la temperatura o a la tensión aplicada (lo cual es admisible en muchos de los circuitos que necesitan resistencias grandes).

En los dos primeros casos (polisilicio y difusión P⁺) puede conseguirse una precisión del 1 % en la utilización de pares de resistencias como divisor de tensión, pues se compensan las desviaciones de ambas resistencias por estar fabricadas con las mismas características tecnológicas, en el mismo proceso de fabricación y muy cercanas entre sí.

Los condensadores integrados suelen ser de valores pequeños (< 1 nF) ya que, si fueran mayores, ocuparían enormes áreas de silicio. Se aprovecha la capacidad de puerta de los transistores NMOS (capacidad puerta sustrato P) para condensadores conectados a 0 V y de los transistores PMOS (capacidad puerta pozo N) si están conectados a V_{CC}.

Para condensadores no conectados a alimentación o de mayor precisión (del orden del 10 %) se utilizan tecnologías de dos polisilicios, configurando el condensador entre ambos con el aislante de óxido de silicio que los separa. Al igual que en el caso de las resistencias, los condensadores apareados presentan precisiones del 1 % en relación a su cociente C₁/C₂.

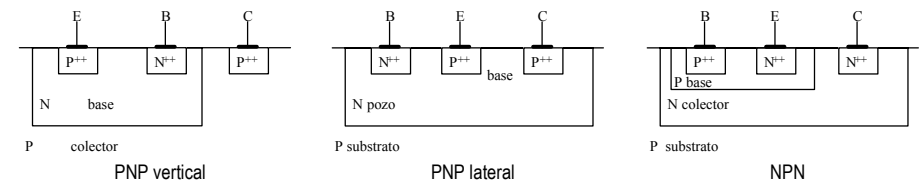
Interesa disponer, también, de transistores bipolares NPN ya que sus prestaciones son mejores que las de los transistores MOS en lo que se refiere a ganancia, intensidad, velocidad y apareamiento:

- la ganancia en tensión V_o/V_i puede ser del orden de 20 a 200 en los transistores MOS, en fuerte dependencia con su anchura W, y mayor de 2000 en los bipolares;
- la intensidad depende, en los transistores MOS, de dicha anchura W y, en cambio, es relativamente independiente de las dimensiones de los bipolares (ya que en ellos, la conducción no se debe a un efecto superficial sino volumétrico);
- la frecuencia de transición f_T, a la cual la ganancia desciende a la unidad, disminuye en los transistores MOS al aumentar su anchura y, en los bipolares, es independiente del tamaño del transistor;
- de forma que requisitos de alta ganancia o alta intensidad imponen, en los transistores MOS, una anchura W grande, lo cual reduce su velocidad de trabajo;
- en relación al apareamiento de transistores fabricados a la vez y en zonas próximas, las etapas con transistores MOS presentan tensiones de *offset* del orden de 10 mV frente a menos de 1 mV con bipolares y, además, los diversos efectos de «desapareamiento» quedan multiplicados por un factor relativo del orden de 500 en el caso MOS y del orden de 20 en el caso bipolar.

Precisamente en etapas digitales que requieren, a la vez, altas intensidades de salida y reducidos tiempos de propagación ha sido conveniente recurrir a los transistores bipolares dentro de la propia evolución de las tecnologías MOS: en su momento (apartados 10.1, panorama general de las familias lógicas integradas, y 20.4, problemas relativos a los buses) destacamos la tecnología BiCMOS (CMOS con transistores bipolares) como muy apropiada para circuitos «interbús» (necesitados de intensidades altas y mínimos tiempos).

De igual forma resultan convenientes los transistores bipolares en las múltiples configuraciones en que se aprovecha el apareamiento de transistores para compensar la falta de precisión de algunas de sus características: espejos de corriente, amplificadores y comparadores con bajo offset, conversores D/A,...

En tecnología CMOS pueden obtenerse transistores PNP parásitos «verticales» conectados a 0 V (difusión P⁺⁺ como emisor, pozo N que actúa de base y sustrato P de colector) o laterales (dos difusiones P⁺⁺, emisor y colector, en el pozo N como base), ambos de baja calidad. Utilizando una máscara más para formar la base pueden obtenerse transistores NPN (sobre un pozo N que actúa de colector, una difusión adicional P como base y una difusión N⁺⁺ sobre ella), pero presentan una resistencia alta en serie con el colector que limita mucho su funcionalidad.



Tecnología BiCMOS

Dadas las malas características de los transistores bipolares que pueden obtenerse en tecnología CMOS, se ha desarrollado una tecnología ampliada, BiCMOS, que requiere dos zonas semiconductoras adicionales y un proceso de rectificación del óxido de campo.

En esquema resumido, las etapas del proceso CMOS son las siguientes:

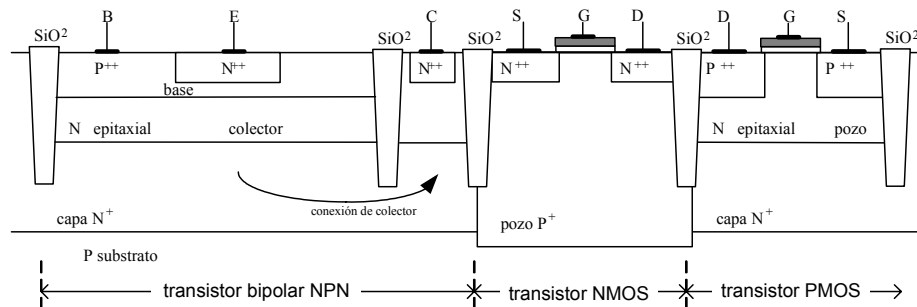
pozos N → óxido de campo → óxido de puerta y polisilicio → difusiones N⁺⁺ → difusiones P⁺⁺ → contactos → metales → pasivación

En cambio, el proceso BiCMOS pasa por las siguientes etapas (ver la figura al final de la descripción de las mismas):

- dopado superficial N⁺ sobre toda la oblea, formando una capa que será utilizada como conexión de colector de los transistores bipolares (con baja resistencia ya que su dopado es alto) y se aprovecha, también, para mejorar la separación de los pozos N respecto al sustrato P que forma la oblea;

- formación de pozos P^+ en las zonas en que irán los transistores NMOS (en tales zonas la anterior capa N^+ es reconvertida en P^+);
- crecimiento de una capa epitaxial N en toda la superficie de la oblea: esta capa actuará como colector de los transistores NPN y como pozo para los transistores PMOS y queda transformada en substrato P en la zona que se forma encima de la anterior capa P^+ (por deriva de portadores gracias al mayor dopado P^+);
- oxidación para separar los transistores: este óxido de campo debe ser relativamente grueso ($> 1 \mu\text{m}$), parte del mismo penetra en el material (su profundidad es algo superior a la de la capa epitaxial pero sin llegar a cruzar del todo la capa inferior N^+) y otra parte sobresale respecto a la superficie de la oblea;
- proceso mecánico de rectificación del óxido de campo que sobresale, a fin de dejar una superficie lisa para los procesos siguientes (ya que se constató que las irregularidades superficiales debidas al óxido de campo producían defectos apreciables en las capas que se depositan encima del mismo);
- formación del óxido de puerta y depósito del polisilicio;
- [en tecnologías de dos polisilicios, depósito de óxido fino de aislamiento entre ellos y del segundo polisilicio encima del mismo]
- implantación P^{++} que forma los transistores PMOS y la base de los NPN;
- implantación N^{++} , menos profunda, para los transistores NMOS y el emisor de los NPN;
- contactos, metales y pasivación.

La figura siguiente representa la configuración de los tres tipos de transistores (bipolar NPN, NMOS y PMOS) en tecnología BiCMOS; en ella se han omitido las polarizaciones de los substratos (del pozo P^+ que actúa como substrato de los NMOS y de la capa epitaxial N que lo hace para el PMOS).



Tipos de etapas y módulos analógicos

En los ASICs mixtos suelen utilizarse los siguientes tipos de configuraciones analógicas, de las cuales, las inferiores sirven también para conformar las de los niveles superiores:

→ Componentes individuales:

- resistencias
- condensadores
- transistores NPN
- transistores NMOS
- transistores PMOS
- uniones PN: diodos
- ...

→ Etapas de tipo básico:

- referencias de tensión
- espejos de corriente
- generadores de intensidad
- amplificadores diferenciales
- adaptadores de impedancias
- puertas de transmisión
- ...

→ Bloques operativos:

- amplificadores operacionales
- comparadores
- OTAs
- ...

→ Módulos de alto nivel:

- filtros
- convertidores D/A
- convertidores A/D
- osciladores controlados por tensión
- ...