

Chapitre 2

Les circuits numériques

2.1 Introduction

Les circuits intégrés logiques ont été développés dans les années 1960. Ils ont permis de regrouper de nombreux composants électroniques sur une seule puce de silicium, offrant des avantages significatifs en termes de taille, de coût et de performance par rapport aux circuits discrets.

L'un des premiers circuits intégrés logiques a été introduit par Texas Instruments en 1962. Il s'agissait d'une porte logique NAND à deux entrées, appelée le circuit intégré TTL (Transistor-Transistor Logic) 7400. Le 7400 a été un énorme succès et a ouvert la voie à d'autres développements dans le domaine des circuits intégrés logiques. Dans les années qui ont suivi, de nombreux autres types de circuits intégrés logiques ont été développés, notamment des portes logiques AND, OR, XOR, des multiplexeurs, des décodeurs, des bascules, des compteurs, etc. Les fabricants de semi-conducteurs tels que Texas Instruments, Fairchild Semiconductor, Intel et d'autres ont contribué à l'avancement et à la diversification des circuits intégrés logiques.

2.2 Architectures classiques des circuits numériques

Au fil du temps, de nouvelles technologies de circuits intégrés logiques ont émergé, telles que la technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) qui offre une consommation d'énergie réduite et une plus grande densité d'intégration. Les circuits CMOS ont gagné en popularité à partir des années 1980 et sont aujourd'hui largement

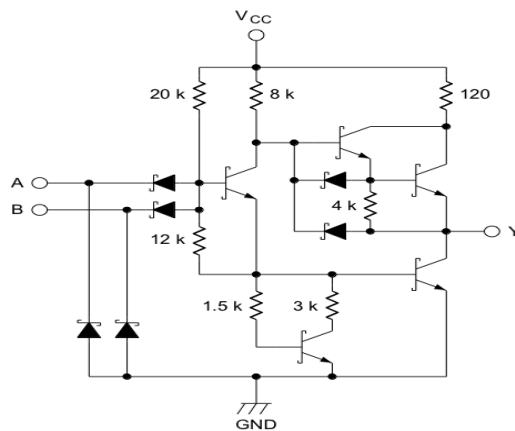


FIGURE 2.1 – Schéma d'une porte du circuit SN74LS00 de Texas Instruments

utilisés dans de nombreux domaines d'application.

2.3 Les circuits standards

Les circuits standards, également connus sous le nom de circuits intégrés standards, sont des dispositifs électroniques préfabriqués qui effectuent une ou plusieurs fonctions logiques ou analogiques spécifiques. Ils sont largement utilisés en électronique pour simplifier la conception et la fabrication de systèmes électroniques. Voici quelques exemples de circuits standards couramment utilisés :

2.3.1 Les fonctions simples

1. Portes logiques :

Les portes logiques sont des circuits standards qui effectuent des opérations logiques de base, telles que l'ET, l'OU, le NON, le OU exclusif, etc. Les circuits logiques les plus courants incluent les portes AND, OR, NOT, NAND, NOR, et XOR.

2. Décodeurs et encodeurs :

Les décodeurs sont des circuits qui prennent une entrée de code binaire et la trans-

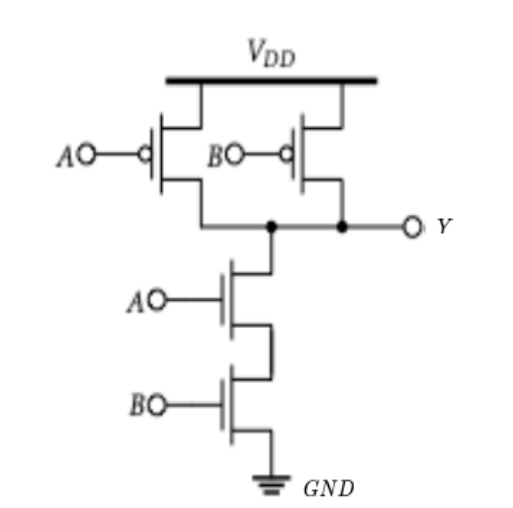


FIGURE 2.2 – Schéma d'une porte du circuit en technologie CMOS

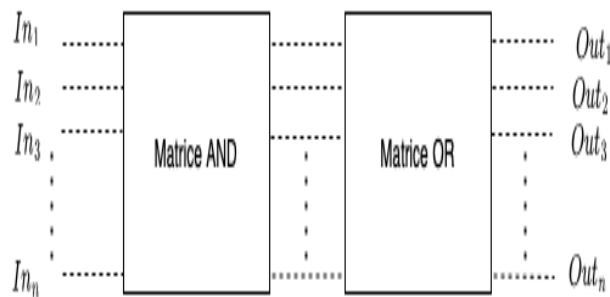


FIGURE 2.3 – Matrices AND et OR programmables

forment en plusieurs sorties en fonction du code d'entrée. Les encodeurs font l'inverse, en prenant plusieurs entrées et en produisant un code binaire de sortie unique. paragraph3.

Multiplexeurs et démultiplexeurs :

Les multiplexeurs sont utilisés pour sélectionner l'une des nombreuses entrées et la rediriger vers une sortie unique en fonction d'une ligne de sélection. Les démultiplexeurs font l'inverse, en prenant une entrée et en la redirigeant vers l'une des nombreuses sorties en fonction d'une ligne de sélection.

4. Bascules et compteurs :

Les bascules sont des circuits qui stockent un état binaire, généralement utilisées pour créer des mémoires temporaires dans les circuits numériques. Les compteurs sont des circuits qui comptent les impulsions d'horloge pour réaliser diverses opérations de comp-

tage.

5. Compérateurs :

Les compérateurs sont utilisés pour comparer deux valeurs binaires et déterminer si elles sont égales ou lesquelles est plus grande. Ils sont couramment utilisés dans les circuits de traitement de signal, de conversion analogique-numérique, et dans d'autres applications.

6. Réseaux de résistances :

Les réseaux de résistances, tels que les réseaux de résistances en échelle et en réseau, sont utilisés pour diviser la tension, créer des diviseurs de tension et réaliser d'autres fonctions analogiques.

7. Amplificateurs opérationnels (op-amps) :

Les amplificateurs opérationnels sont des circuits amplificateurs utilisés dans une grande variété d'applications analogiques, notamment les amplificateurs de signaux, les filtres actifs, les compérateurs, etc.

8. Mémoires :

Les mémoires, comme les mémoires RAM (Random Access Memory) et les mémoires ROM (Read-Only Memory), stockent des données et des instructions pour les systèmes informatiques. Convertisseurs analogique-numérique (CAN) et numérique-analogique (CNA) : Les CAN convertissent des signaux analogiques en signaux numériques, tandis que les CNA effectuent l'inverse, convertissant des signaux numériques en signaux analogiques. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment les systèmes de communication et de traitement du signal.

9. Horloges et oscillateurs :

Les horloges et oscillateurs génèrent des signaux d'horloge et des signaux oscillants à une fréquence spécifique, ce qui est essentiel dans la synchronisation des opérations dans les systèmes électroniques.

Ces circuits standards sont des blocs de construction essentiels pour la conception de systèmes électroniques complexes. Ils sont disponibles sous forme de composants discrets,

de circuits intégrés (CI) ou de circuits intégrés programmables (FPGA, CPLD) et sont utilisés dans une grande variété d'applications, de l'électronique grand public aux systèmes embarqués et aux télécommunications.

2.4 Les microprocesseurs et les DSP

Les microprocesseurs et les DSP (processeurs de signal numérique) sont deux types de processeurs utilisés dans les systèmes informatiques et électroniques, mais ils ont des applications et des caractéristiques spécifiques qui les rendent adaptés à des tâches différentes.

2.4.1 Microprocesseurs

1. Usage général :

Les microprocesseurs sont des processeurs polyvalents conçus pour exécuter une variété de tâches. Ils sont couramment utilisés dans les ordinateurs personnels, les serveurs, les smartphones et une multitude d'autres dispositifs électroniques.

2. Architecture :

Les microprocesseurs sont basés sur des architectures de type Von Neumann, ce qui signifie qu'ils exécutent des instructions stockées en mémoire et peuvent traiter une large gamme de types de données.

3. Flexibilité :

Les microprocesseurs sont très flexibles et peuvent être programmés pour effectuer différentes tâches en fonction du logiciel exécuté. Ils conviennent aux systèmes nécessitant une grande flexibilité et une variété d'applications.

4. Performance en virgule flottante :

La plupart des microprocesseurs offrent des unités de calcul en virgule flottante, mais ils ne sont pas optimisés pour les calculs intensifs en virgule flottante.

5. Traitement des entrées/sorties :

Les microprocesseurs sont généralement équipés d'une grande variété de périphériques d'entrée/sortie, ce qui les rend adaptés aux systèmes qui nécessitent une interaction avec de nombreux périphériques externes.

2.4.2 DSP (Processeurs de Signal Numérique)

:

1. Applications spécifiques :

Les DSP sont conçus pour effectuer des opérations de traitement de signal numérique, telles que le filtrage, la transformée de Fourier rapide (FFT), la convolution, etc. Ils sont couramment utilisés dans les applications de traitement audio, de traitement d'image, de télécommunications, de radars, etc.

2. Architecture :

Les DSP sont basés sur des architectures Harvard, ce qui signifie qu'ils ont des mémoires séparées pour les données et les instructions. Cette architecture les rend plus efficaces pour les calculs de signal numérique.

3. Optimisation pour la virgule flottante :

Les DSP sont souvent optimisés pour les calculs en virgule flottante et sont capables de manipuler rapidement des données en virgule flottante. Cela les rend idéaux pour les applications de traitement de signal qui impliquent des calculs intensifs en virgule flottante.

4. Traitement en temps réel :

Les DSP sont souvent utilisés dans des systèmes de traitement en temps réel où les données doivent être traitées rapidement, comme les systèmes audio en temps réel, les radars et les systèmes de communication.

5. Moins de flexibilité :

Contrairement aux microprocesseurs, les DSP sont moins flexibles et sont généralement conçus pour effectuer des tâches de traitement de signal spécifiques. Ils ne sont pas

adaptés aux applications nécessitant une grande variété de tâches.

En résumé, les microprocesseurs sont polyvalents et adaptés à une large gamme d'applications, tandis que les DSP sont optimisés pour des tâches de traitement de signal spécifiques. Le choix entre les deux dépend de l'application particulière et des exigences en termes de traitement de signal. Parfois, les systèmes intègrent à la fois un microprocesseur et un DSP pour tirer parti de leurs avantages respectifs.

2.4.3 Les mémoires

Les mémoires jouent un rôle crucial dans les systèmes informatiques et électroniques en permettant le stockage et l'accès aux données et aux programmes. Il existe plusieurs types de mémoires, chacun ayant des caractéristiques spécifiques adaptées à différentes applications. Voici une vue d'ensemble des principaux types de mémoires :

1. Mémoire vive (RAM - Random Access Memory) :

La RAM est une mémoire volatile utilisée pour stocker temporairement les données et les programmes en cours d'exécution par un ordinateur ou un système électronique. Elle permet un accès aléatoire rapide aux données, ce qui en fait un choix idéal pour le stockage de données en cours d'utilisation. Les données stockées dans la RAM sont perdues lorsque l'alimentation électrique est coupée.

2. Mémoire morte (ROM - Read-Only Memory) :

La ROM est une mémoire non volatile utilisée pour stocker des données ou des programmes en lecture seule.

Elle conserve les données même lorsque l'alimentation est coupée, ce qui en fait un choix approprié pour le stockage de programmes de démarrage (firmware), de paramètres de configuration, etc.

La ROM peut être programmée une seule fois (PROM), programmable une fois (OTPROM), ou programmable et effaçable électriquement (EEPROM).

3. Mémoire flash :

La mémoire flash est une mémoire non volatile couramment utilisée dans les dispositifs de stockage tels que les disques SSD, les clés USB et les cartes mémoire.

Elle combine la vitesse d'accès aléatoire de la RAM avec la rétention de données de la

ROM. La mémoire flash peut être programmée et effacée de manière électronique, ce qui la rend réinscriptible.

4. Mémoire cache :

La mémoire cache est une mémoire volatile de haute performance utilisée pour stocker temporairement des données souvent utilisées, réduisant ainsi le temps d'accès à la mémoire principale (RAM).

Il existe généralement plusieurs niveaux de caches dans un processeur, tels que le cache de niveau 1 (L1), le cache de niveau 2 (L2) et le cache de niveau 3 (L3), chacun offrant différentes tailles et performances.

5. Mémoire de masse :

Les mémoires de masse, telles que les disques durs (HDD) et les disques SSD, sont utilisées pour le stockage à long terme de données sur des ordinateurs et des serveurs.

Les HDD utilisent des disques magnétiques rotatifs pour stocker des données, tandis que les SSD utilisent des puces de mémoire flash. Les mémoires de masse offrent des capacités de stockage importantes par rapport à la RAM, mais avec un temps d'accès plus long.

6. Mémoire de programme :

Les mémoires de programme, également appelées mémoires de stockage de programme (PROM), stockent les instructions exécutées par un microprocesseur ou un microcontrôleur.

Les mémoires de programme peuvent être de différents types, tels que les mémoires ROM, les mémoires flash ou les mémoires EEPROM, en fonction des exigences du système.

7. Mémoire vidéo (VRAM) :

La VRAM est une mémoire utilisée dans les cartes graphiques pour stocker les données d'image, ce qui permet une lecture et une écriture simultanées pour une performance graphique optimale.

8. Mémoires de stockage embarquées :

Ces mémoires, souvent intégrées dans des microcontrôleurs, stockent des données telles

que des paramètres de configuration ou des données temporaires pour une application spécifique.

9. Mémoire tampon (Buffer) :

Les mémoires tampons sont utilisées pour temporiser et gérer le transfert de données entre différents composants électroniques, tels que des capteurs, des interfaces de communication et des unités de traitement.

Les mémoires sont essentielles dans la conception des systèmes électroniques et informatiques, car elles permettent le stockage, la récupération et le traitement efficace des données et des programmes. Le choix du type de mémoire dépend de l'application spécifique, des performances requises et des contraintes de coût.

2.5 Les circuits spécifiques à l'application ASIC

Les ASIC (Application-Specific Integrated Circuits), ou circuits intégrés spécifiques à une application, sont des puces électroniques personnalisées conçues pour effectuer une tâche spécifique ou un ensemble de tâches étroitement liées. Contrairement aux FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) qui peuvent être reprogrammés, les ASIC sont fabriqués sur mesure pour une application particulière. Voici quelques exemples de circuits spécifiques à l'application ASIC :

1. ASIC numériques :

Les ASIC numériques sont conçus pour effectuer des tâches numériques spécifiques, telles que le traitement de signal, le cryptage, le décodage, la compression vidéo, etc. Ils sont optimisés pour des performances élevées et une faible consommation d'énergie, adaptés aux applications nécessitant un traitement intensif des données.

2. ASIC analogiques :

Les ASIC analogiques sont spécialisés dans le traitement de signaux analogiques, tels que l'amplification, la conversion analogique-numérique (CAN), la conversion numérique-analogique (CNA), le filtrage, etc.

Ils sont utilisés dans des applications telles que l'audio, la communication sans fil, l'instrumentation, etc.

3. ASIC mixtes :

Les ASIC mixtes combinent à la fois des composants numériques et analogiques sur une puce. Ils sont couramment utilisés dans les systèmes qui nécessitent une interface entre le monde numérique et le monde analogique, tels que les systèmes de communication sans fil.

4. ASIC de gestion de puissance :

Ces ASIC sont conçus pour gérer efficacement la consommation d'énergie dans les appareils électroniques. Ils peuvent contrôler l'alimentation des composants pour minimiser la consommation d'énergie lorsque cela n'est pas nécessaire.

5. ASIC embarqués :

Les ASIC embarqués sont intégrés dans des appareils spécifiques, tels que des appareils médicaux, des systèmes de navigation, des capteurs, etc. Ils sont optimisés pour les contraintes spécifiques de l'application.

6. ASIC de cryptographie :

Ces ASIC sont conçus pour effectuer des opérations de cryptographie, telles que le chiffrement et le déchiffrement, la génération de clés, etc. Ils sont utilisés dans la sécurité des communications, les cartes à puce, etc.

7. ASIC pour l'automobile :

Les ASIC pour l'automobile sont spécifiquement conçus pour répondre aux exigences de l'industrie automobile, y compris la fiabilité, la robustesse et les températures de fonctionnement étendues.

8. ASIC pour les télécommunications :

Ces ASIC sont utilisés dans les équipements de télécommunication, tels que les commutateurs, les routeurs, les modems, etc., pour gérer le traitement des signaux et des données.

9. ASIC pour l'aérospatiale et la défense :

Les ASIC destinés à ces applications doivent répondre à des exigences strictes en ma-

tière de résistance aux radiations, de durabilité et de performances dans des environnements hostiles.

10. ASIC pour les capteurs et l'Internet des objets (IoT) :

Les ASIC pour les capteurs et l'IoT sont conçus pour des applications à faible consommation d'énergie et de traitement de données sur des périphériques intelligents et connectés.

La conception et la fabrication d'ASIC sont coûteuses et nécessitent une expertise spécialisée.

Cependant, ils offrent une haute performance, une faible consommation d'énergie et une intégration personnalisée pour des applications spécifiques, ce qui les rend essentiels dans de nombreuses industries.

2.6 Les circuits programmables PLD

L'évolution des circuits intégrés logiques a également conduit au développement de dispositifs programmables tels que les PLD (Programmable Logic Device), qui permettent la personnalisation des fonctions logiques en fonction des besoins spécifiques des applications.

Les réseaux logiques programmables appelés aussi Programmable Logic Device (PLD) sont des circuits intégrés programmables qui permettent aux ingénieurs électroniques de concevoir et de mettre en œuvre des circuits numériques personnalisés. Les PLD sont utilisés pour une grande variété d'applications électroniques, allant des contrôles industriels aux systèmes de télécommunications, en passant par les ordinateurs et les équipements de réseaux.

2.6.1 Réalisation de la matrice AND et OR

On utilise le principe d'une porte AND et OR à partir des diodes selon les figures 2.4 et 2.5.

Les PLD sont particulièrement utiles pour les applications qui nécessitent des fonctions logiques complexes, car ils peuvent être programmés pour exécuter des fonctions

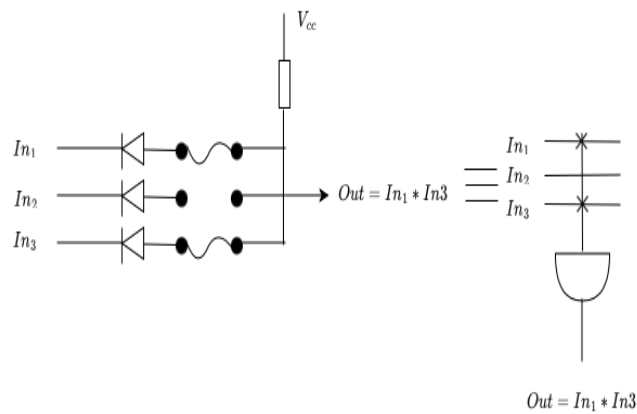


FIGURE 2.4 – Matrices AND programmée

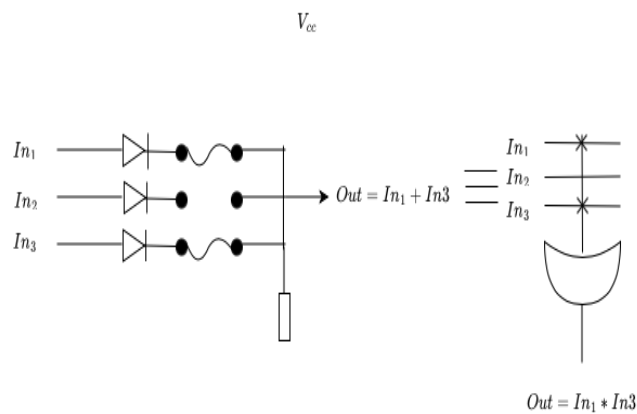


FIGURE 2.5 – Matrices OR programmée

logiques spécifiques en utilisant des portes logiques telles que des AND, OR, NOT, XOR, ...etc.

Les PLD peuvent également être utilisés pour implémenter des fonctions de séquençement, telles que des compteurs et des registres.

Les deux types de PLD les plus couramment utilisés sont les CPLD (Complex Programmable Logic Device) et les FPGA (Field Programmable Gate Array).

Les CPLD sont généralement utilisés pour les applications à faible densité de portes logiques, tandis que les FPGA sont utilisés pour les applications à haute densité de portes logiques.

Les avantages des PLD sont nombreux, notamment la flexibilité de conception, la capacité de mise à jour logicielle, la réduction des coûts de fabrication et le temps de commer-

cialisation plus rapide. Cependant, les PLD ont également des inconvénients, notamment une complexité accrue de la conception et des coûts plus élevés que les circuits intégrés standard.

2.6.2 Les prés-caractérisés

Les PLD pré-caractérisés sont conçus avec une configuration spécifique qui les rend appropriés pour une application particulière. Cette configuration peut inclure des fonctions logiques, des connexions internes, des temporisateurs, des compteurs, etc.

Simplicité d'utilisation : Les PLD pré-caractérisés sont souvent plus simples à intégrer dans un projet, car leur fonctionnalité est pré-déterminée et ne nécessite pas de programmation supplémentaire de la part de l'utilisateur.

Applications spécifiques : Ces dispositifs sont couramment utilisés dans des applications où une fonction logique ou de traitement spécifique est requise, mais où la flexibilité d'un FPGA (Field-Programmable Gate Array) n'est pas nécessaire. Par exemple, ils sont utilisés dans les systèmes de contrôle, les applications embarquées, les télécommunications, etc.

Exemples de PLD pré-caractérisés : Certains exemples de PLD pré-caractérisés incluent les CPLD (Complex Programmable Logic Devices) pré-programmés, les microcontrôleurs pré-programmés, les ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) pré-configurés et les FPGA pré-programmés pour des tâches spécifiques.

Économie d'énergie : Dans certaines applications, les PLD pré-caractérisés peuvent être plus économes en énergie que les FPGAs, car ils sont optimisés pour une fonction particulière, ce qui signifie qu'ils n'incluent que les composants nécessaires à cette fonction.

Réduction des coûts : Ils peuvent également réduire les coûts de développement, car l'ingénierie de conception est simplifiée, et il n'est pas nécessaire de concevoir une configuration personnalisée.

Limitations : Cependant, les PLD pré-caractérisés sont moins flexibles que les FPGAs et ne peuvent pas être reconfigurés pour effectuer d'autres tâches une fois en place. Ils sont spécifiquement adaptés à leur application initiale.

En résumé, les PLD pré-caractérisés sont des dispositifs électroniques avec une fonctionnalité pré-déterminée pour des applications spécifiques. Ils offrent une solution efficace et économique pour les tâches de traitement de signal et de logique spécifiques sans la

complexité de la programmation de FPGA ou d'ASIC personnalisés.

2.6.3 Les circuits programmables simples SPLD

Les SPLD (Simple Programmable Logic Devices), ou dispositifs logiques programmables simples, sont une catégorie de circuits logiques programmables qui offrent une flexibilité limitée par rapport aux dispositifs plus complexes tels que les CPLD (Complex Programmable Logic Devices) et les FPGA (Field-Programmable Gate Arrays). Les SPLD sont conçus pour des applications relativement simples qui nécessitent une logique combinatoire personnalisée ou une petite quantité de logique séquentielle. Voici quelques caractéristiques et exemples de SPLD :

1. *Architecture simplifiée :*

Les SPLD ont généralement une architecture simplifiée par rapport aux CPLD et FPGA. Ils comprennent généralement des éléments de logique combinatoire, des bascules et des interconnexions.

2. *Applications :*

Les SPLD sont adaptés aux applications qui nécessitent des fonctions logiques spécifiques, telles que la génération de signaux de contrôle, le traitement de signaux simples, la détection de conditions logiques, etc.

3. *Programmation :*

Les SPLD sont programmables à l'aide d'un langage de description matérielle (HDL) ou d'un outil de conception assistée par ordinateur (CAO). Leur programmation consiste souvent à configurer les équations logiques des fonctions combinatoires.

4. *Exemples de SPLD :*

Les GAL (Generic Array Logic), les PAL (Programmable Array Logic) et les SPLD de type fuse-link sont des exemples courants de SPLD.

GAL (Generic Array Logic) :

Les GAL sont des dispositifs programmables qui permettent de configurer une matrice de portes logiques et de bascules pour créer des fonctions logiques personnalisées. Ils

sont simples à programmer et sont couramment utilisés pour des applications de logique combinatoire.

PAL (Programmable Array Logic) :

Les PAL sont des dispositifs plus anciens qui offrent une logique programmable combinatoire à petite échelle. Ils étaient populaires pour la conception de circuits logiques discrets.

SPLD de type fuse-link :

Certains SPLD utilisent des fusibles pour configurer la logique interne, ce qui les rend non reprogrammables une fois programmés. Cela les rend adaptés à des applications spécifiques.

5. Complexité limitée :

Les SPLD ont une complexité limitée par rapport aux CPLD et FPGA. Ils sont adaptés aux tâches de logique relativement simples, mais ils ne sont pas aussi flexibles que les dispositifs plus avancés.

6. Economie d'espace :

En raison de leur petite taille et de leur complexité limitée, les SPLD sont souvent utilisés lorsque l'espace sur la carte de circuit imprimé est limité.

7. Coût abordable :

Les SPLD sont généralement moins coûteux que les CPLD et les FPGA en raison de leur simplicité et de leur capacité réduite.

En résumé, les SPLD sont des circuits programmables simples conçus pour des applications de logique relativement simples. Ils offrent une alternative économique à la conception de circuits discrets tout en permettant une personnalisation limitée de la logique combinatoire. Cependant, pour des tâches plus complexes, les CPLD et les FPGA offrent une flexibilité et une capacité de traitement supérieures.

2.6.4 Les circuits programmables complexes CPLD

Les CPLD (Complex Programmable Logic Devices), ou dispositifs logiques programmables complexes, sont des circuits logiques programmables intermédiaires entre les SPLD (Simple Programmable Logic Devices) et les FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) en termes de complexité, de capacité de logique et de flexibilité. Voici quelques caractéristiques des CPLD :

1. Architecture complexe :

Les CPLD ont une architecture plus complexe que les SPLD. Ils contiennent généralement plusieurs blocs de logique programmables interconnectés, des bascules de stockage, des multiplexeurs et des routes de signalisation.

2. Capacité logique :

Les CPLD sont capables de mettre en œuvre des fonctions logiques complexes, de la logique combinatoire à la logique séquentielle. Ils sont adaptés aux applications qui nécessitent une logique plus complexe que ce que peuvent offrir les SPLD.

3. Programmation :

Les CPLD sont programmés à l'aide d'outils de CAO (conception assistée par ordinateur) qui permettent aux concepteurs de spécifier les fonctions logiques souhaitées en utilisant des langages de description matérielle (HDL) ou des outils graphiques. Les CPLD peuvent être reprogrammés, ce qui les rend flexibles pour les itérations de conception.

4. Applications :

Les CPLD sont utilisés dans une variété d'applications, notamment le contrôle logique, la gestion des signaux d'entrée/sortie, la génération de signaux de synchronisation, le traitement de données, etc.

5. Complexité limitée :

Bien que les CPLD soient plus complexes que les SPLD, ils ont une complexité limitée par rapport aux FPGA. Cela les rend appropriés pour des applications de taille moyenne à grande.

6. Routes de signalisation :

Les CPLD disposent de routes de signalisation configurables qui permettent de faire passer les signaux entre les blocs de logique. Cette flexibilité permet de créer des chemins de signal personnalisés pour répondre aux besoins de la conception.

7. Economie d'espace :

Les CPLD sont plus compacts que les FPGA, ce qui en fait un choix judicieux pour les applications où l'espace sur la carte de circuit imprimé est limité.

8. Coût :

Les CPLD sont généralement moins coûteux que les FPGA en raison de leur complexité réduite.

9. Durabilité :

Les CPLD sont conçus pour une utilisation industrielle robuste et peuvent fonctionner dans des environnements difficiles, tels que l'automobile ou l'aérospatiale.

10. Sécurité :

Les CPLD peuvent être utilisés pour implémenter des fonctions de sécurité, telles que la protection contre la copie ou la sécurité des communications.

En résumé, les CPLD sont des dispositifs logiques programmables qui offrent une capacité logique et une flexibilité supérieures par rapport aux SPLD, tout en restant plus abordables que les FPGA. Ils sont utilisés dans une variété d'applications qui nécessitent une logique de taille moyenne à grande et sont une option attrayante pour les ingénieurs qui souhaitent équilibrer la complexité de la conception avec les coûts de développement.