

Mikroelektronika összefoglaló jegyzet

October 24, 2023

1 Az integrált áramkörök gyártástechnológiája I. – Alapfogalmak

1.1 A szilícium technológia (Silicon manufacturing process)

A mai integrált áramkörök túlnyomó többsége szilícium alapanyagú horodozón készül. Egyéb célokra (pl.: optoelektronikai, nagyfrekvenciás, teljesítményelektronikai eszközök) készülhetnek más, legtöbbször vegyületfélvezető anyagból (pl. szilícium-karbid, galliumarzenid stb.), melyek azonban inkább diszkrét vagy alacsony integráltságú eszközök.

A szilícium alapú integrált áramköri gyártástechnológia eleinte a szilícium jó elektromos tulajdonságainak köszönhető a széles körű elterjedését, melyhez hozzájárult a könnyen növeszthető, jó szigetelő és maszkoló rétegeként egyaránt használható oxidja: a szilícium dioxid (SiO_2). Mindezek eredményeképpen mára a szilícium alapanyagra épülő gyártástechnológia annyira fejletté vált, hogy a mai IC-k integráltsági szintjét és gyártási költségét más félvezetőkkel egyelőre megközelíteni se lehet. Azért, hogy erről a területről teljesebb képet kapjunk a következőkben a szilíciummal, mint félvezető alapanyaggal, és a szilícium alapanyagú hordozóra planártechnológiával készült integrált áramkörök gyártástechnológiájának néhány fontos aspektusával ismerkedhetünk meg.

Az integrált áramkörökben az áramkör összes tranzisztorát és egyéb elektronikus alkatrészét (dióda, ellenállás, stb.) egy chipen, azaz egyetlen egy darab szilícium chip-ben alakítják ki. Ehhez a kezdetben egységes szilíciumtömb anyagtulajdonságait lokálisan meg kell változtatni, hiszen csak így alakulhatnak ki a különböző elektronikus alkatrészekhez (pl.: tranzisztorok, diódák) szükséges, eltérő anyagtulajdonságokkal rendelkező rétegek. Integrált áramkörökben nagyszámú eszközt alakítanak ki (modern processzorokban akár több milliárd tranzisztor lehet egy chip-en), és az egyes eszközök elválasztása is eltérő anyagparaméterű részekkel történik. A monolit (azaz egy alapanyagtömbben kialakított) integrált áramkörök kialakításához tehát szükségünk van egy olyan technológiára, amelynek segítségével a tömbi szilícium anyagi (főként elektromos) paramétereit csak és kizárólag a kívánt helyen változtathatják meg.

Az alapanyag villamos paramétereit általában adalékolással, azaz idegen atomok szándékos, célzott és kontrollált bevitelével változtatjuk meg lokálisan, így kialakítva az aktív eszközökhöz szükséges donor és akceptor adalékolású (n és p-típusú) régiók, melyek a félvezető elektron és lyukvezetési képességeit határozzák meg. [1] Szilícium félvezető esetén adalékanyagnak leggyakrabban foszfor (P) és bór (B) anyagot alkalmaznak.

Az adalékolás mellett léteznek további technológia lépések, amelyeket csak lokálisan szeretnénk végrehajtani, mint például a tömbi szilícium vagy egyéb rétegek lokális eltávolítása, marása vagy éppen ennek az ellentéte, egyes rétegek lokális növesztése. Ahhoz, hogy ezeket a lépéseket csak lokálisan végezhessük el (tehát mintázatot tudjunk kialakítani), szükség van egy olyan ún. maszkoló rétegre, amely megvédi az alatta lévő alapanyagot azokon a helyeken, ahol az egyes folyamatokat nem szeretnénk végrehajtani. Ennek a maszkoló rétegnek tehát nem a teljes felületen, hanem csak meghatározott helyeken (lokálisan) kell a felületen lennie, ezért a maszkoló rétegeken is mintázatot kell kialakítani. Ez általában úgy történik, hogy a maszkoló réteget a teljes felületre felviszik (például SiO_2 esetén növesztéssel), majd fotolitográfiával (2.6. fejezet) jelölik ki azokat a helyeket, ahol nincs szükség maszkoló rétegre, és innen egy szelektív (például csak a megvilágított maszk anyagot támadó) marószert segítségével eltávolítjuk a nem kívánt részeket. A megfelelő mintázattal rendelkező maszkoló réteggel borított félvezetőn pedig már elvégezhetjük az adott – mintázatnak megfelelően, csak lokálisan – elvégzendő gyártástechnológiai lépéseket (adalékolás, maratás, rétegnövesztés stb.). A különböző adalékolású részeket (2.7. fejezet), felületen futó vezetékeket, stb. tehát gyakorlatilag a kész integrált áramkört az előzőekben vázolt folyamat (maszkolás, fotolitográfia, mintakialakítás) gondosan megtervezett sorrendben történő ismétlésével alakíthatjuk ki. A szilícium alapú integrált áramkörök gyártástechnológiája így különböző részfolyamatokból épül fel, ahol minden egyes részfolyamat lényegében a maszkoló réteg felviteléből, maszkoló réteg mintázásából és az alapanyag jellemzőinek változtatására szolgáló technológia lépésből áll.

1.2 A szilícium mechanikai és kristálytani tulajdonságai

A szilícium a periódusos rendszer 14-es rendszámú eleme, kb. 1400°C fokig szilárd halmazállapotú. Négy vegyértékű, így a kristályrácsában minden atomnak négy legközelebbi szomszédja van, ezek a vegyérték elektronok segítségével kapcsolódnak össze. Elemi cellája egy felületen középpontos, köbös szerkezet, amelybe egy hasonló szerkezet van beleágyazva a testátló irányában $1/4$ rácsállandóval eltolva. Ez a gyémántrács, amelynek a szilícium a kiváló mechanikai tulajdonságait köszönheti. Az elemi cellát és a szilícium legfontosabb kristálysíkjait a 2-1. ábra mutatja. A szilícium rácsállandója, azaz az elemi cellájának (2-1. ábrán látható kocka) élhossza $0,357\text{ nm}$, ami azt jelenti, hogy az egykristály szilícium rácsában az egyes szilícium atommagok egymástól kb. 5 Å távolságban helyezkednek el.

KÉP

A rácsszerkezet a szilícium egyik legfontosabb tulajdonsága, mely meghatározza villamos és mechanikai paramétereit egyaránt. Jó félvezető alapanyagként csakis a kevés hibával rendelkező, egykristályos szilícium jöhet számításba. A szilícium egy fontos tulajdonsága, hogy egyes kristálytani irányokban a gyártástechnológia során másképp viselkedik (például különböző az adalékatamok behatolási mélysége), ezért nem mindegy, hogy milyen orientációjú a szeletünk (azaz a szelet felületét melyik kristálytani sík alkotja). A három leggyakrabban használt orientáció kristálysíkjaként a 2-1. ábra mutatja be. Egyes lúgos marószerek pl. lényegesen gyorsabban marják az $\{100\}$ kristálysíkokat, mint az $\{111\}$ síkot, amelyet alakzatok marására szokás kihasználni. Bipoláris integrált áramkörökhöz előszeretettel használnak $\{111\}$ -es orientációjú szeleteket, mivel ezeken a szeleteken könnyebben és gyorsabban növeszthető epitaxiális réteg. CMOS áramkörök gyártásához azonban elterjedtebb az $\{100\}$ orientációjú szeletek, mert ezeknél az ionimplantálás (2.7.2. fejezet) végezhető el könnyebben.

KÉP

Ha a szilícium mechanikai tulajdonságait tekintjük, akkor az 1. táblázatból láthatjuk, hogy egy rendkívül kemény és nagy szakítószilárdságú anyagról van szó. Sűrűsége ezzel ellentétben igen alacsony. Összehasonlításképpen láthatjuk, hogy annak ellenére, hogy könnyebb, mint az alumínium, szakítószilárdsága meghaladja a titánét. Ezen tulajdonsága miatt előszeretettel alkalmazzák mikromechanikai rendszerekben alapanyagként. Egyetlen rossz mechanikai tulajdonsága a ridegsége, melynek következtében már igen csekély alakváltozás esetén is törik, amelyet a mikrorendszerek tervezésekor figyelembe kell venni. Ezzel szemben a megengedett tartományon belüli tartós és ismételt igénybevétel esetén sincs szerkezeti, illetve szilárdsági változás, vagyis sem rugalmatlan alakváltozás, sem pedig fáradás nem lép fel. További jó fizikai tulajdonságai közé tartozik a viszonylag magas hővezetése, ami megkönnyíti a szilíciumból készült chippek hűtését.