

6.ТОПОЛОГИЧНО ПРОЕКТИРАНЕ НА БИПОЛЯРНИ

ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ПРИБОРИ

6.1. ПРОБЛЕМИ ПРИ ИЗГОТВЯНЕТО НА ДИСКРЕТНИ И ИНТЕГРАЛНИ ПОЛУПРОВОДНИКОВИ ЕЛЕМЕНТИ. ИЗОЛАЦИЯ

При производството на дискретни и интегрални биполярни полупроводникови елементи се използват едни и същи техноологични процеси, при което разликите в техноологичните схеми се дължат на особеностите на интегралната техника:

а/ интегралните компоненти се изготвят най- често на базата на $p-n$ подложка;
б/ за изолация на отделните компоненти е необходимо провеждането на допълнителни техноологични операции.

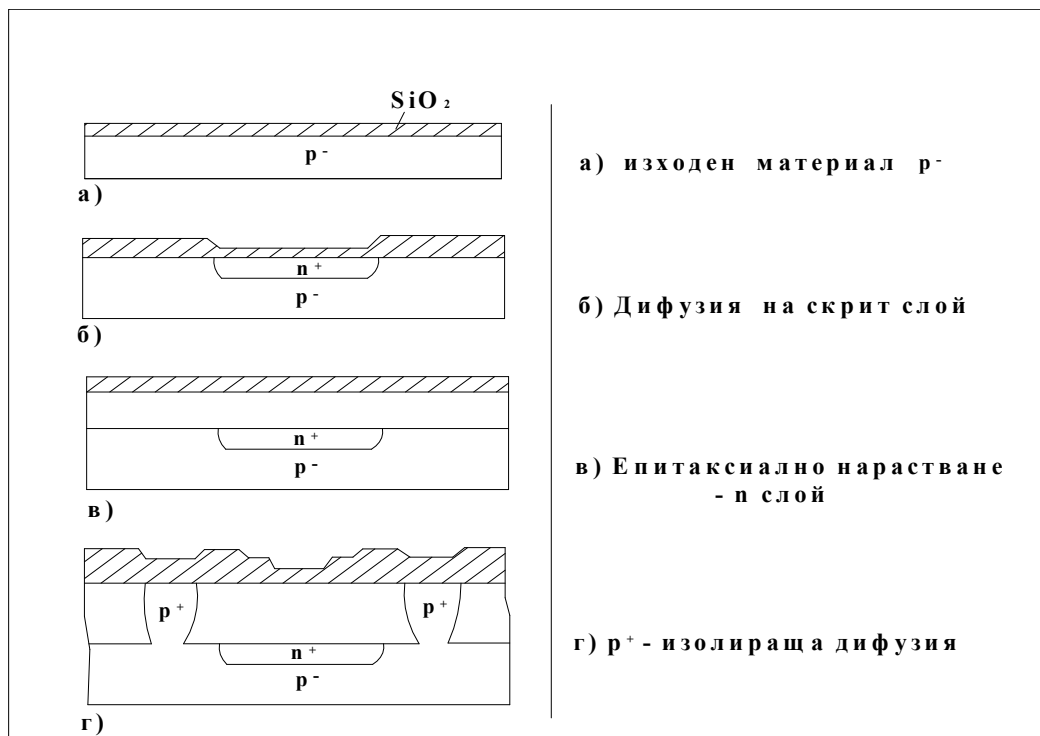
Отделните елементи и/или групи от елементи в една интегрална схема обикновено се изолират в самостоятелни „островчета“ в епитаксиалния слой. Обикновено тези „островчета“ представляват колекторните области на компонентите. В един такъв „остров“ биват събрани транзистори с еднакъв колекторен потенциал. В зависимост от това какъв тип изолация се използва, различаваме:

- изолация с $p-n$ преход;
- диелектрична изолация.

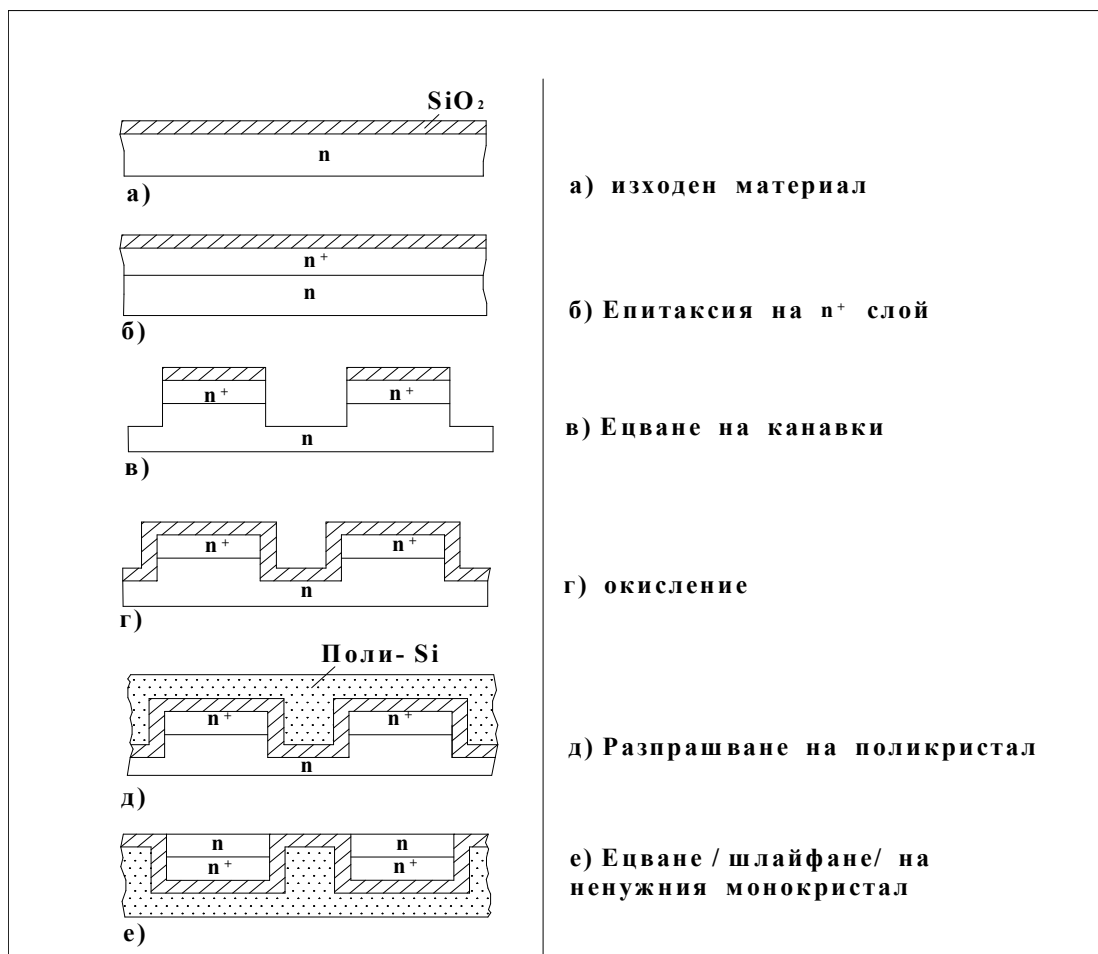
При използване на изолация чрез $p-n$ преход съществуват няколко варианта. За всеки един от тях е характерно, че изолацията се осъществява чрез подаване на обратно напрежение на един $p-n$ преход. На фиг.6.1. е показана техноологичната схема за случая на $p-n$ изолация. Недостатъците на $p-n$ изолацията са следните:

- високи паразитни капацитети;
- силна зависимост от температурата на токовете на утечка;
- ниски напрежения на пробив;
- допълнителни източници на шум;
- наличие на паразитен транзистор през подложката.

Както вече беше споменато, съществуват някои особености и варианти при изолацията с $p-n$ преход, като например тримаск- техниката или изолация чрез използване на колекторната дифузия. На фиг.6.2. е показана техноологичната схема за изготвяне на структури чрез използване на диелектрична изолация.

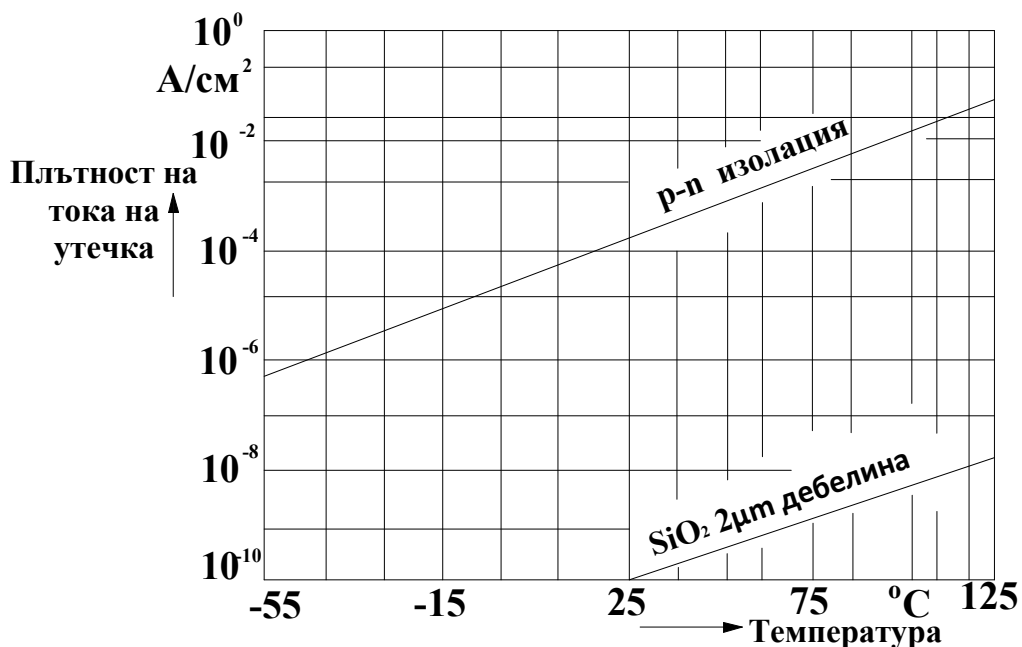


Фиг.6.1 Технологична схема за p – n- изолация



Фиг.6.2 Технологична схема за диелектрична изолация

Основното предимство на изолацията чрез диелектрично покритие е, че недостатъците на изолацията чрез р- преход, казани по- горе, се отстраняват. Освен силициев двуоксид за изолацията се използват и други диелектрични покрития. Различаваме още няколко различни метода за реализиране на изолация. На фиг.6.3./а,б/ са показани някои от параметрите, които могат да бъдат постигнати чрез различните видове изолации.



Фиг.6.3.а Сравнение за показаните изолации

	Площ на „островчето“ μm ²	Ток на утечка 25° C, nA		Капацитет, pF	
		pnSiO ₂ (2μm)		pnSiO ₂ (2 μm)	
Транзистор 100Ω	10 ⁴	10	10 ⁻⁵	3	0,3
Съпротивление 1к Ω	1,5.10 ⁴	15	1,5.10 ⁻⁵	4,5	0,45
Съпротивление 10к Ω	4. 10 ⁴	40	4. 10 ⁻⁵	12	1,2
Съпротивление	2.10 ⁵	200	2.10 ⁻⁴	60	6

Фиг.6.3.б Параметри за показаните изолации

6.2. ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА АКТИВНИ И ПАСИВНИ КОМПОНЕНТИ ПРИ БИПОЛЯРНАТА ТЕХНИКА.

При топологичното проектиране на съпротивления, кондензатори, диоди и транзистори при биполярната техника трябва да се има предвид основната концепция: технологичната схема е подчинена на електрофизическите параметри на транзисторите. Това означава, че параметрите на отделните технологични операции се задават така, че да бъдат постигнати параметрите на транзисторите. За другите компоненти тази технологична схема е изходен пункт за по-нататъшно оразмеряване. Това означава също така, че хоризонталната геометрия /топологията/ е единствената възможност за постигане на определените предварително зададени стойности за тези компоненти. Същото се отнася и за транзисторите, когато в една схема има транзистори с различни електрофизически параметри. В случая конструктивно-технологичните параметри, без хоризонталната геометрия, за всички е еднаква. С изключение на разлика в подложката и на изолацията, технологичните схеми на дискретните и интегралните елементи са еднакви.

6.2.1. Оразмеряване на интегрален транзистор.

На фиг.6.4.a/ са показани топологията на един интегрален транзистор и напречното сечение на структурата. От фиг.6.4. можем да проследим хоризонталната геометрия на интегрален транзистор с един извод на колектора и един извод на базата, както и вертикалната геометрия на структурата. Съществуват и други хоризонтални геометрии на интегрални биполярни транзистори. На фиг.6.5 е показано хоризонталната геометрия на транзистор с два извода на базата и два извода на колектора. За математическо описание на вертикалната геометрия на тези транзистори и необходимите технологични операции виж лекционния материал.

За да определим площта, която интегралният или дискретен транзистор заемат от общата площ на проектирания чип, е необходимо да отчетем минималния размер на отвора на контактите -b- и минималната разрешаваща способност -a- характеризиращи заложената фотолитография като процес и точността на постигане на фронтите на дифузията. От значение са и стойностите на дълбочината на епитаксиалния слой x_c и максималната плътност на тока за дадения полупроводников материал. Обикновено минималната ширина на контактите е равна или кратна на разрешаващата способност /за случая - 5 μm /.

Можем да пресметнем по следния начин площта на транзистора съгласно фиг.6.4:

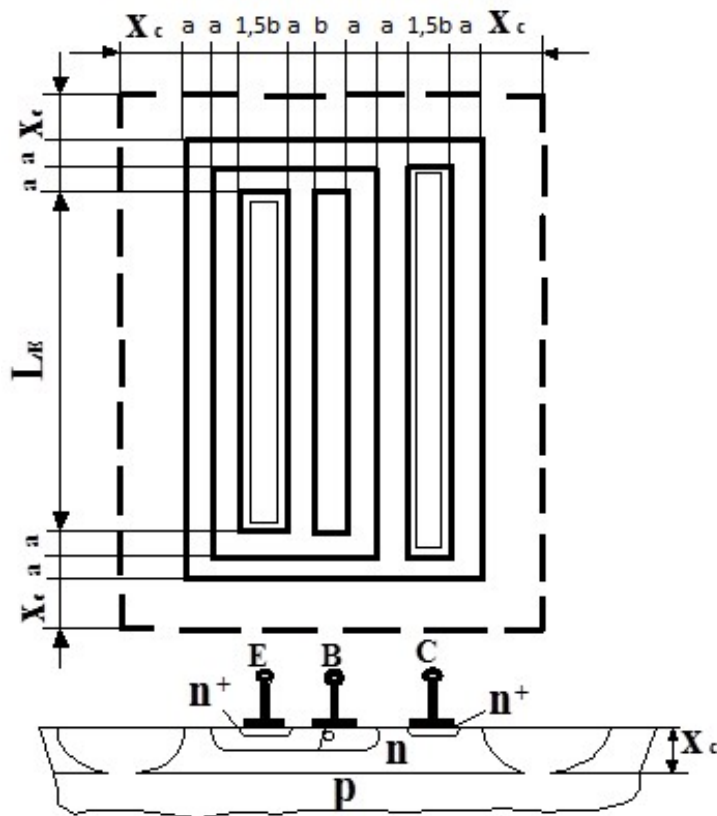
$$A_{\text{тр}} = (2x_c + 6a + 4b)(L_E + 2x_c + 4a)$$

където x_c е дълбочината на епитаксиалния слой/канал/, в случая $x_c = 10 \mu\text{m}$.

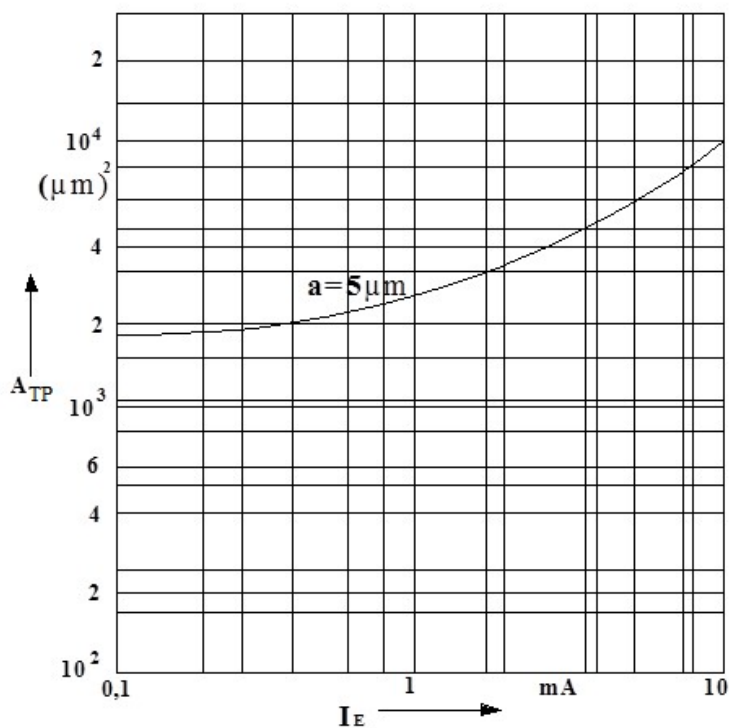
$$\text{Ако } A_E = 1,5 \cdot b \cdot L_E = \frac{I_E}{S_{\text{max}}}, \quad \text{следва} \quad L_E = \frac{I_E}{1,5 \cdot b \cdot S_{\text{max}}}$$

Където S_{max} е избраната плътност на тока.

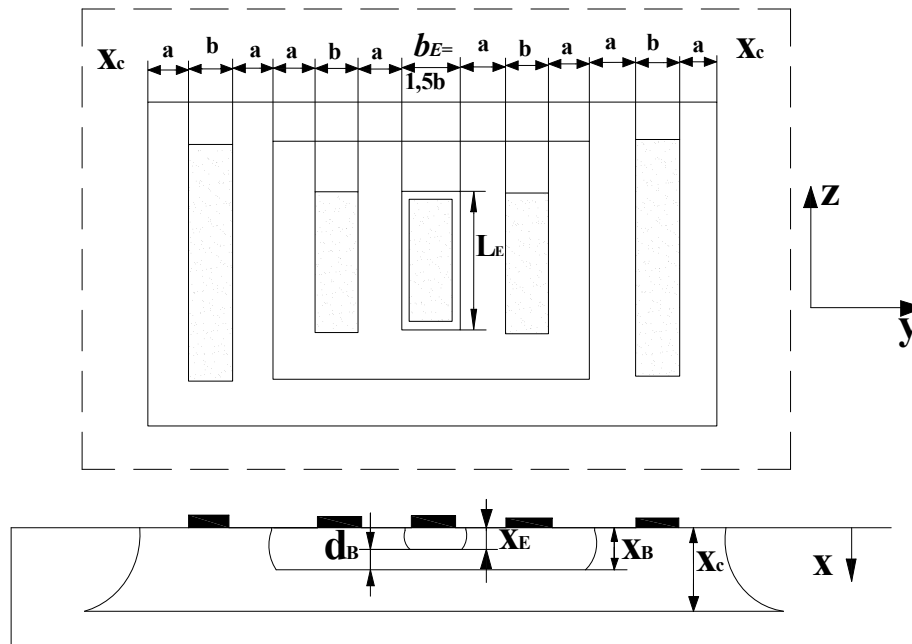
В уравнението нов елемент е дължината на емитера L_E . Тя се определя от големината на емитерния ток и максималната допустима плътност на тока за силиция. Плътността на тока може да бъде между 400 и 10000 А/см², като обикновено се избират стойности в интервала 1000-10000 А/см². Това прави между 10 и 100 μА/μm². Съгласно фиг.6.4.а в най-общия случай получаваме :



Фиг. 6.4а Хоризонтална и вертикална геометрия на интегрален транзистор



Фиг. 6.4б Площ на структурата в зависимост от разрешаващата способност -а



Фиг. 6.5 Структура при два контакта на базата и колектора

$$A_{\text{тр}} = \frac{I_E}{1,5 \cdot b \cdot S_{\text{max}}} \cdot \left[(2x_c + 6a + 4b) + \frac{(2x_c + 4a) \cdot (2x_c + 6a + 4b)}{L_E} \right]$$

За $a=b=5 \cdot 10^{-4}$ см, $x_c=10 \mu\text{m}$, $S_{\text{max}}=10^{-2} \text{mA}/\mu\text{m}^2$, $A_{\text{тр}}/\mu\text{m}^2=12 I_E/\text{mA} + 2100$ (сравнете площта за 1 или 10 mA)

На фиг.6.4. б/ е показана зависимостта на изчислената площ на транзистора за случая на един контакт на базата и на един контакт на колектора, в зависимост от големината на емитерният ток и приетата стойност на максималната плътност на тока. Към оразмеряването и изобщо проектирането на активните компоненти в биполярната техника може още да се каже, че съществува голям избор при определянето на топологията на транзисторите. Освен това в интегралната техника се използват не само n-p-n транзистори, а също така и p-n-p транзистори, особено за нуждите на линейните интегрални схеми. За p-n-p транзистори се използват различни варианти: подложката на интегралната схема за колектор, тъй нареченият вертикален p-n-p транзистор и конструкцията на латерални транзистори. Такива разновидности на транзисторите се използват широко в операционните усилватели. При проектирането само на дискретни компоненти използването на n^+ подложка позволява колекторният контакт да бъде от обратната страна на пластината. Това е единствената разлика между интегралния и дискретен транзистор. За особени случаи може да бъде изграден и p-n-p транзистор или тиристорна структура, чрез използване на допълнителни технологични операции.

6.2.2. Диоди

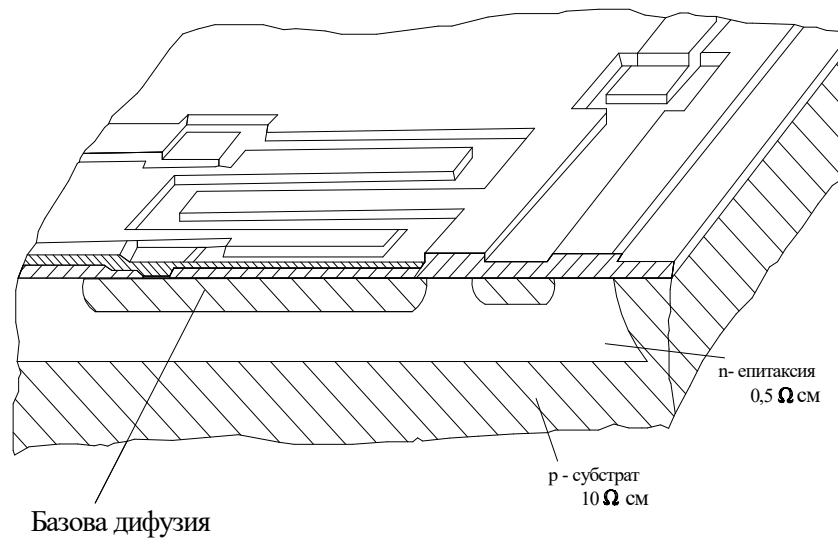
За изготвяне на диодни структури в ИС използваме конструкциите на планарно-епитаксиални транзистори в интегрално изпълнение. При интегралните диоди на разположение на конструктура са два различни прехода, които могат да бъдат използвани за получаване на диоди. На фиг.6.6. са показани две различни включвания на наличните p- n преходи и са описани най-важните им характеристики.



Фиг. 6.6 Видове интегрални диоди

6.2.3. Оразмеряване на интегрални съпротивления за нуждите на биполярната техника.

В монолитните интегрални схеми интегралните съпротивления се наричат още дифузионни съпротивления, защото за тяхното получаване се използват главно емитерната и базова дифузия от технологичната схема на активните компоненти. Като съпротивление може да бъде използван и епитаксиалният канал. Но стойностите на съпротивленията, получени по този начин, не са благоприятни за минимизиране площта на чипа.



Фиг. 6.7 Хоризонталната геометрия на интегрални съпротивления

Хоризонталната геометрия на интегралните резистори предлага две различни форми на изготвяне: във форма на ивици или под формата на меандър. На фиг 6.7 е показан обемен чертеж на двете разновидности в хоризонталната топология. Ширината на отделните ивици варира между 10 и 50 μm . Тя зависи от възможностите на фотолитографията и от разсейваната мощност в съпротивленията.

Ако в областта, където е извършена базова дифузия, бъде извършена и емитерна дифузия, получаваме така нареченото скрито съпротивление. При извършване на базовата и емитерна дифузия се получават разпределения на примесите, показани в лекционния материал. Като типични стойности на листовото съпротивление на отделните видове дифузии могат да се използват следните стойности:

R_s - за емитерната дифузия- 5Ω

R_s - за базовата дифузия - 200Ω

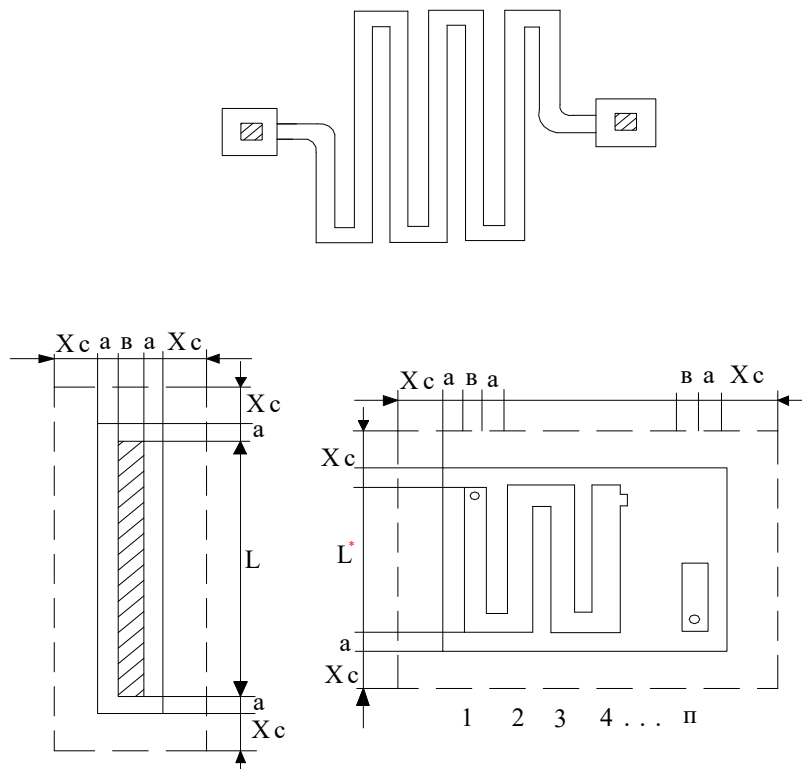
При двойното използване на дифузиите, т.е. при така наречените скрити съпротивления, листовото съпротивление може да бъде 700Ω

Колкото е по - голямо листовото съпротивление, толкова е по- силна температурната зависимост на изготвените дифузионни съпротивления. Обикновени стойности представляват температурни коефициенти от 0,5 до $10^{-3}/^\circ\text{C}$ за емитерната дифузия, $2 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ и $4 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ за останалите видове дифузионни съпротивления. При определянето на топологията основното правило гласи, че трябва да бъде избрана минималната възможна ширина на дифузионната област. Един пример за площта, необходима на едно съпротивление от $10\text{ k}\Omega$ при ширина на ивицата $15\mu\text{m}$, изготвяно чрез базова дифузия, изисква $750\mu\text{m}$ дълъг меандър, което отговаря на $11000\mu\text{m}^2$ /площта, необходима за един транзистор е, примерно, $750\mu\text{m}^2$ /. На фиг.6.8 е показана таблица с по- важните параметри на интегралните съпротивления, получени по

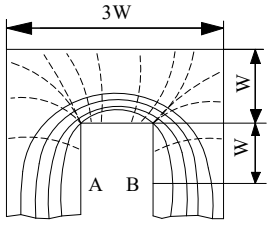
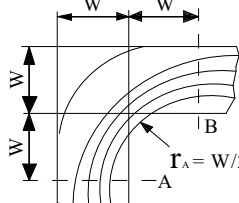
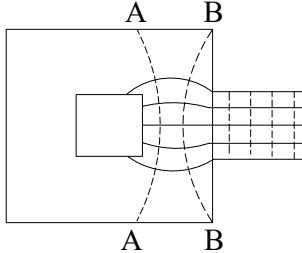
различните методи на биполярната техника. Като пример за оразмеряване на едно интегрално съпротивление разгледайте топологията на едно интегрално съпротивление във форма на меандър, показано на фиг.6.9. Ако дълбочината на базовата дифузия е $2\ \mu\text{m}$, концентрацията на епитаксиалния слой $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ и повърхностната концентрация - $10^{19}/\text{cm}^2$, с помощта на кривите на Ирвин отчитаме средната специфична проводимост за случая $x=0$, т.к. интегралното съпротивление е изготвено по метода на базовата дифузия. След това изчисляваме листовото съпротивление. Стойността на съпротивлението получаваме чрез преброяване броя на квадратчетата, като контактните места и чупките на меандъра отчитаме, съгласно фиг.6.10. При необходимост от оразмеряване на едно съпротивление по зададена стойност, постъпваме по обратния ред. Освен стойностите на съпротивлението, от голямо значение е изчисляването на необходимата площ за него.

R_s Ω	R Ω	V_{max} V	P_v W. mm^{-2}	TOL %	TK $\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
50 ... 250	20k	20 ... 80	4 ... 5	10 ... 20	0,2
2 ... 6	2,5...1k	5 ... 7	4 ... 5	10 ... 20	0,2
2k ... 10k	500k	6 ... 7		20	

Фиг.6.8. Таблица с по-важните параметри на интегралните съпротивления,



Фиг.6.9. Горизонтална геометрия на резистори

Геометрична форма	$\frac{R_{AB}}{R_s}$
	4,05
	2,45
	0,65

Фиг.6.10 Таблица за корекции при меандрова конструкция

Необходимата площ зависи главно от геометричната форма, стойността на съпротивлението, листовото съпротивление R_s , максималната допустима разсейвана мощност P_{max} и тока I , който тече през съпротивлението.

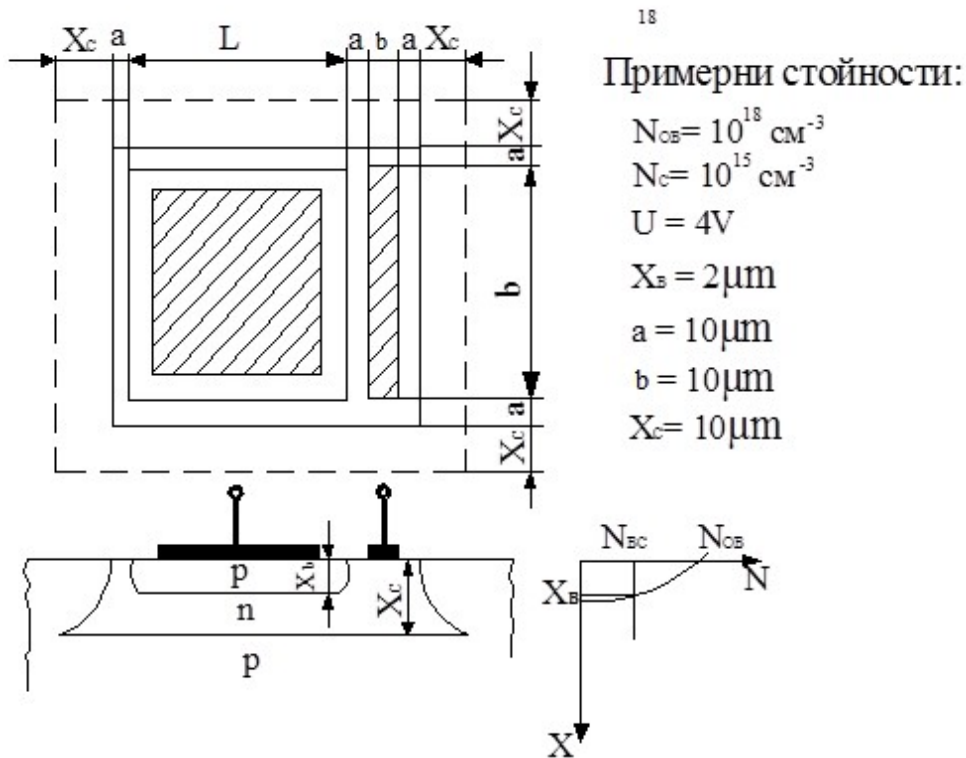
Изчисленията показват, че съпротивление, изготвено във форма на меандър, има обикновено три пъти по малка площ от същото съпротивление, изготвено с форма на ивица. При това оптималното число извивки на меандъра трябва така да бъде избрано, че общата форма на „островчето“ в епитаксиалния слой да бъде квадрат.

6.2.4. Оразмеряване на интегрални кондензатори.

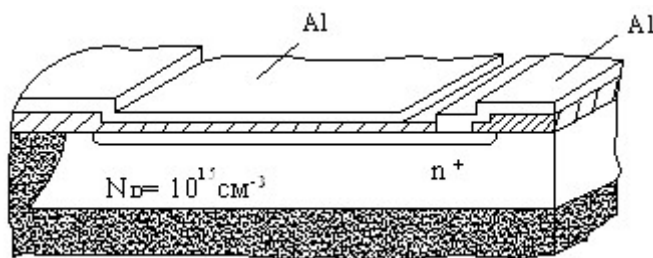
Като кондензатори в интегралните схеми се използват кондензатора на обратно включен р-п преход или кондензатора на една MOS-структура. Характерното е, че дори малки стойности на кондензатора, например 10 pF, изискват площ, колкото тази на транзистор. Разликата между двата кондензатора е, че кондензаторът, използващ р-п преход, винаги е поляризован и стойността на кондензатора зависи от приложеното напрежение. На фиг.6.11/a/. е показана хоризонталната и вертикалната геометрия на един кондензатор с р-п преход.

Зададените примерни стойности отговарят на случай от практиката и могат да послужат за изчисляване на кондензатора на единица площ и на площта, необходима за изготвяне на този кондензатор. Изчисляването на кондензатора на единица площ C' става с помощта на фиг. 6.12. В тази диаграма начина на работа е следния:

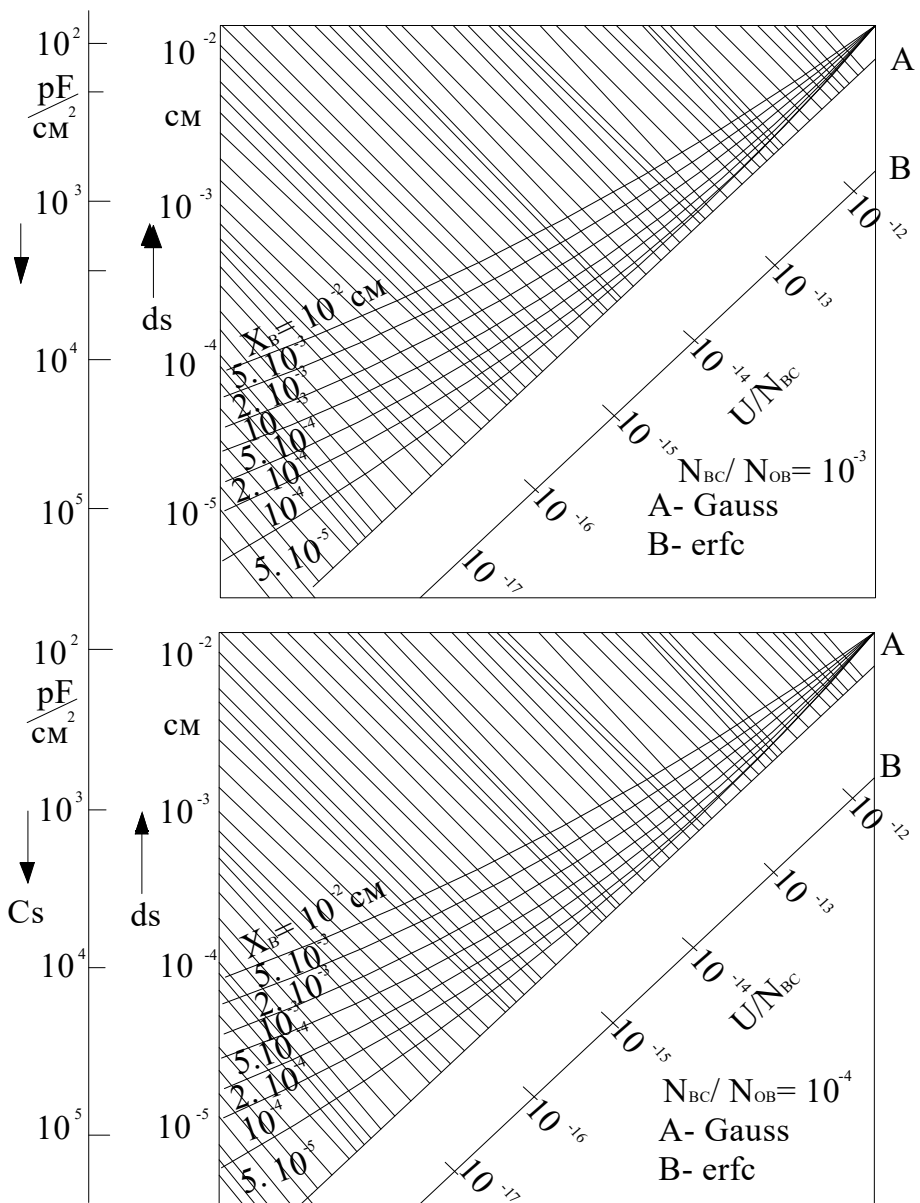
От приложеното напрежение 4 волта и използваната концентрация на примесите на епитаксиалния канал $10^{16}/\text{cm}^3$ намираме стойността върху правата линия, в случая $4 \cdot 10^{-16}/\text{cm}^3$. Правата *b* отговаря на разпределение erfc , а правата *a* на Гаусово разпределение. Тъй като базовата дифузия се изпълнява по метода дифузия от ограничен източник, нейното разпределение е Гаусово. Следователно стойността $4 \cdot 10^{16}$ отчитаме по правата *A*. След това търсим пресечната точка с кривата, параметър на която е дълбочината на дифузията, в случая 2 микрона. От тази стойност определяме стойността на капацитета C' на единица площ, в случая $120 \frac{\text{pF}}{\text{mm}^2}$. За да изчислим площта на кондензатора използваме разсъждения, подобни на тези за изчисляването на съпротивленията. На фиг 6.11/б/ е показана структурата на кондензатор, използващ капацитета на системата метал- SiO_2 - полупроводник. MOS- кондензаторът притежава това преимущество, че неговият капацитет не зависи от приложеното напрежение.



Фиг.6.11/а/ Горизонтална и вертикална геометрия на кондензатор с p- n преход.



Фиг.6.11/б/ Горизонтална и вертикална геометрия на MOS-кондензатор



Фиг.6.12 Номограма за проектиране на кондензатор с р-п преход.

6.3. ЦЕЛ, ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ НА УРАЖНЕНИЕТО

6.3.1.Целта на това упражнение е да бъде събран опит и рутината при топологичното осъществяване на биполярни интегрални прибори по предварително зададена вертикална геометрия.

6.3.2. Задачи на упражнението

1. Изчислете минималната ширина на дифузионно съпротивление за ток $I = 1\text{mA}$, максимална разсейвана мощност за единица площ 5 W/mm^2 и листово съпротивление $200\ \Omega/\square$, за структури с топология, съгласно фиг.6.9.

При изчисленията приемаме, че разстоянията между два дифузионни фронта a е равно на $10\ \mu\text{m}$ и дълбочината на епитаксиалния слой x_c е равна също на $10\ \mu\text{m}$.

Изчислете: площта, необходима за изграждането на съпротивлението, ако неговата стойност $R = 25\ \text{k}\Omega$, изчислете минималното число на разклоненията на меандъра за предварително определената площ на съпротивлението. Сравнете площта на съпротивление, изградено във форма на меандър с площта на съпротивление във форма на ивица;

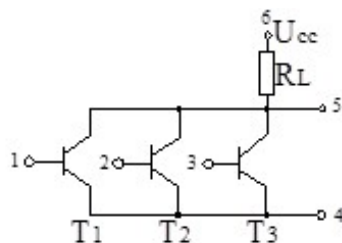
2. Минимизирайте площта на един интегрален кондензатор, съгласно фиг.6.11. Използвайте стойностите от фиг.6.11. и изчислете площта, необходима за реализирането на един кондензатор с капацитет C . Потърсете в резултат на минимизирането оптималното съотношение между размерите b и L на кондензатора;

3. Начертайте типови хоризонтални геометрии на :

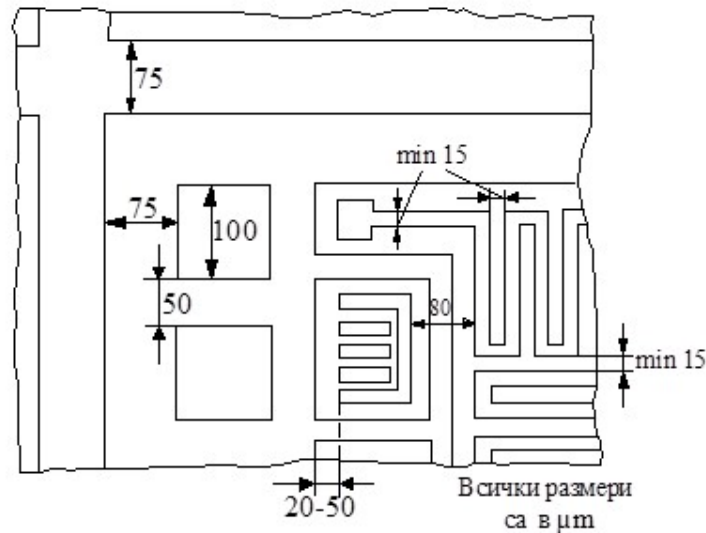
- интегрален n-p-n транзистор
- p-n-p латерален транзистор
- p-n-p транзистор, използващ подложката на интегралната схема;

4. Снемете електрическата схема на изследваната микроснимка и разпознайте отделните компоненти;

5. Начертайте примерната топология за схемата от фиг.6.13



Фиг. 6.13. Примерна електронна схема



Фиг. 6.14. Допълнителни елементи и отстояния за общата хоризонтална конструкция

6.3.3. Пояснителни бележки

За изчисляване на площта и геометричните размери по първата задача на упражнението, използвайте фиг.6.9, както и математическия апарат, описан в лекционния материал:

$$P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot R_s \cdot \frac{Lb}{b^2}; \quad P_{\max} = \frac{I^2 \cdot R_s}{b^2}; \quad b_{\min} = \sqrt{\frac{I^2 R_s}{P_{\max}}}$$

$$AR_I = \left(b + \frac{R}{R_s} 2a + 2xc\right)(b + 2a + 2xc)$$

$$AR_{II} = (L + 2a + 2xc)(2xc + n(b + a) + a)$$

$$L = n \cdot (L + a)$$

сл. $AR_{II} = \left(\frac{b \cdot R}{n \cdot R_s} + a + 2xc\right)(2xc + n(b+a) + a)$

Извършете изчисленията и за други стойности на разстоянието между два дифузионни фронта a и на дълбочината на епитаксиалния канал x_c . Обяснете получените резултати и сравнете изчисленията за различните хоризонтални геометрии на интегралните съпротивления.

За изпълнение на задачите за изчисляване на площта на интегралните кондензатори използвайте фигурите 6.11 и 6.12.

	Спец. кон. pF/mm ²	Площ за 10 pF µm x µm	Пробивно напрежение V	Зависимост от напрежение
Преход Е- В	6.10 ² ... 1,5.10 ³	100x100	12 15 ... 5	Поляризован
Преход В-С	300 ... 500	145x145	90 100 ... 55	Поляризован
Преход С-С	150 100 ... 200	250x250	60	Поляризован
MOS- кондензатор <i>d_{SiO₂}</i> = 100nm	500	140x140	50 d _{min} =50nm при 25V	Неполяризован независим

От тези фигури могат да бъдат записани следните математически зависимости:

$$A_c = (2xc + 3a + b + L).(2xc + 2a + b)$$

$$C_s = C'.b.L$$

$$b = \frac{C_s}{C'.L}$$

$$A_c = (2xc + 3a + b + L)(2xc + 2a + \frac{C_s}{C'.L})$$

$$C' = 120 \frac{pF}{mm^2} / \text{фиг.6.12./}$$

$$\left. \frac{dA_c}{dL} \right|_{L=L_{opt}} = 0 \quad \text{сл. } L_{opt}, b_{opt}$$

$$\left(\frac{b}{L} \right) = \frac{C_s}{C'.L^2_{opt}} = \frac{2xc + 2a}{2xc + 3a + b}$$

Разгледайте приложената микроснимка към упражнението. Изяснете видовете интегрални компоненти, от които е изградена интегралната схема.

Отбележете на схемата видовете компоненти, като ги снабдите с номер, например транзистори – T₁, T₂, ..., T_x, съпротивления – R₁, R₂, и т.н. определете броя на контактните места и начертайте електрическата схема на интегралната схема. Създайте си пълна изяснена картина на разположението и топологията на всеки елемент от интегралната схема и неговото еквивалентно обозначение в електрическата схема.

Начертайте вертикалното разпределение в избран от вас мащаб и оцветете различните области, характеризиращи тази интегрална схема.

Спазвайте основните правила при извършване на топологичното проектиране.

Определете транзисторите, имащи общи функции, в групи.

При извършване на топологичното проектиране на чипа ползвайте фиг.6.14. На тази фигура са показани някои от допълнителните елементи и отстояния, необходими да бъдат спазени при проектирането на всяка топология.

Следвайте правилото, че площта на чипа трябва да бъде минимална.

Транзисторите с еднакъв колекторен потенциал групирайте в едно „Островче“ от епитаксиалния канал. Използвайте следните стойности за оразмеряване на електронната схема от 6.13:

- съпротивление на базовата дифузия – 200Ω
- максимална плътност на тока $S_{\max} = 1000 \text{ A/cm}^2$
- максималната разсейвана мощност на единица площ- $P_v = 8 \text{ W/mm}^2$
- минимална ширина, постигана от фотолитографията - $a = 5 \text{ микрона}$
- напрежение на колектора /захранващо/ - $5,2 \text{ V}$
- товарно съпротивление $R = 2,4 \text{ k}\Omega$

Използвайте и за двете фигури хоризонтални геометрии на транзисторите с един извод на базата и един извод на колектора /показани в началото на упражнението/.