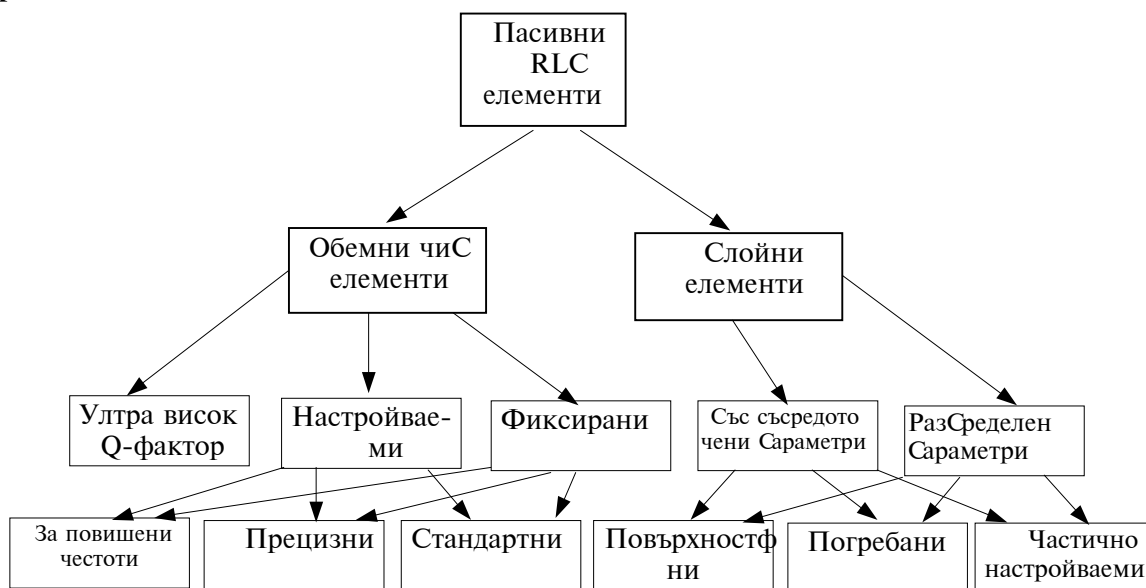


## ГЛАВА 8

### 8. ПРОЕКТИРАНЕ НА ПАСИВНИ RLC ЕЛЕМЕНТИ В ХИБРИДНИ МСМ

Едно класифициране на пасивните елементи отчитащо елементи на технологичното им изготвяне и конструктивно-функционално приложение е дадено на долната фигура. Тази класификация е приложима и при хибридните МСМ.

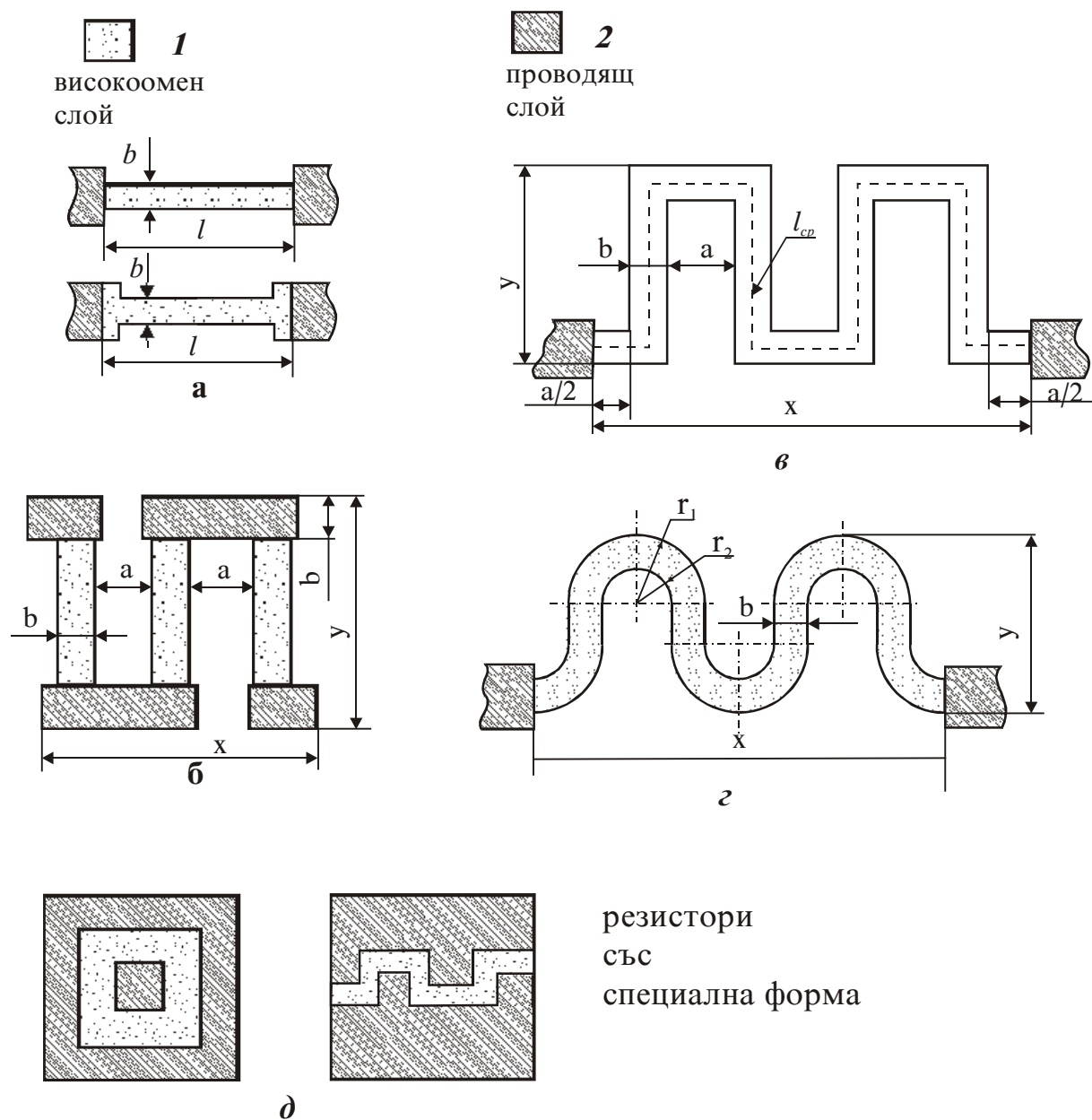


**Фиг. 8.1. Примерна класификация на RLC елементи в хибридни МСМ.**

#### 8.1. Проектиране на слойни R елементи в хибридни МСМ.

На първоначалния етап на проектиране на конструкцията на слойни резистивни елементи се избира формата му и се изчисляват геометричните му размери. Формата и геометрията се определя от неговата номинална стойност  $R$ , листово съпротивление  $R_s$ , точността с която той трябва да се изготви  $\gamma_R$ , площ върху подложката, която заема резистивния слой, максимално допустимата разсеяна мощност на слоя върху подложката  $P_o$ , разсейвана мощност от резистора -  $P$ , област на честотно приложение и технологичен процес за изготвянето му. Най-разпространените топологични варианти на слойни резистори са: правоъгълна форма, меандър, змиевидна форма, последователно-паралелна комбинация на отрязъци от резистори, във вид на централна контактна площадка и др. Трябва да се направи уточнението, че сложните

форми се използват предимно в тъкостройната технология, където листовото съпротивление  $R_s$  на материала е ниско и значително по-трудно се достигат високи номинали за  $R$ . В някои случаи по-сложната форма може да бъде продиктувана от изискване за пробивно напрежение, топлинно натоварване или взаимни влияния.



Фиг. 8.2. Конфигурация на слойни резистори: а) правоъгълна, с намалено контактно съпротивление; б) съединени отрязъци; в) меандър; г) тип змия; д) централна контактна площадка, нискоомни; 1 - резистивен слой; 2 - метализация за контактни площадки.

Забележка: Тези рисунки не отразяват точно технологичния процес, а дават топологичните форми. Например при стандартната

тънкослойна технология, площта под проводящите контактни площадки е изцяло запълнена с резистивен материал (б.а.).

$$1) K_{\Phi} = \frac{l}{b} - \text{коэффициент на формата}$$

$$R_s = \frac{\rho}{d} - \text{листово съпротивление [ } \Omega/\square \text{ ]}$$

$d$ -дебелина на резистивния слой

$\rho$ - обемно специфично съпротивление на резистивния

слой

$$2) R = R_s K_{\Phi} = \frac{\rho l}{d b}$$

За резистори с правоъгълна форма и  $K_{\Phi} \geq 1$  имаме:

$$3) b_p = \sqrt{\frac{R_s P}{R P_o}} - \text{минимална ширина, при която се разсейва зададената}$$

мощност  $P$ . В действителност токовата плътност в слоя определя неговата надежност, но в инженерната практика се работи с мощността отделена при протичането на този ток.

$$P = I^2 R - \text{номинална мощност, [W]}$$

$$P_o - \text{мах. допустима разсейвана мощност, [W/cm}^2\text{]}$$

$$4) \text{ избира се } b \geq \max(b_p, b_{\Delta}, b_{\text{техн}})$$

$$5) b_{\Delta} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{K_{\Phi}}}{\gamma_{R\Delta}}; \Delta b, \Delta l - \text{точност при технологично}$$

възпроизвеждане на размерите

$$6) \gamma_{R\Delta} = \gamma_R - (\gamma_{R_s} + \gamma_{R_t} + \gamma_{R_{old}} + \gamma_{R_k}) [\%]$$

$\gamma_{R_s}$  - грешка при възпроизвеждане на  $R_s$

$\gamma_{R_t}$  - температурна грешка на съпротивлението

$\gamma_{R_{old}}$  - грешка, обусловена от стареенето на резистивния слой

$\gamma_{R_k}$  - грешка от съпротивленията на контактите резистивен/проводящ слой.

$b_{\text{техн}}$  - минимална ширина на резистора, допустима от технологията на изготвяне.

За резистори с правоъгълна форма и  $K_{\Phi} \leq 1$  имаме:

$$7) \text{ Избира се } l \geq \max(l_p, l_{\Delta}, l_{\text{техн}})$$

$$8) l_p = \sqrt{\frac{R P}{R_s P_o}}$$

$$9) l_{\Delta} = \frac{\Delta l + k_{\Phi} \Delta b}{\gamma_{R\Delta}}$$

За резистори с формата от фиг.8.б) имаме:

$$10) R = \frac{XR_s(Y-2b)}{b^2(m+1)} \quad ; \quad X \text{ и } Y \text{ са дължина и ширина на контура, в}$$

който се вписва резистора,  $m = a/b$

$$11) b = \frac{-XR_s + \sqrt{X^2R_s^2 + RR_sXY(m+1)}}{R(m+1)}$$

$$12) n = \frac{X}{a+b}; \text{ брой резистивни отрязъка, ако предварително знаем } X, a, b.$$

Оптималните размери се получават при  $X=Y$ . При решаване на обратната задача, т.е. знаем  $b$ , за  $X$  и  $Y$  се получава:

$$13) X = Y = b\left(1 + \sqrt{1 + K_\Phi(m+1)}\right)$$

За резистори с форма тип “меандър” имаме:

$$14) R = \frac{R_s X}{b(a+b)}(a + Y - 0,92b) \text{ при условие, че}$$

$$\frac{Y-b}{b} > 3, \text{ а } \frac{a}{2b} > 0,4$$

$$15) X = \frac{b}{2} \left[ -(m - 0,92) + \sqrt{(m - 0,92)^2 + 4K_\Phi(m+1)} \right]$$

Отново избираме  $X=Y$ , а  $m=a/b$ . Ако представим резистора като  $n$  на брой  $Z$  - образни звена то за априорна оценка на площта на меандъра имаме:

$$16) n = \sqrt{\frac{a^2}{4(a+b)^2} + \frac{l_{ave}}{a+b}} - \frac{a}{2(a+b)}$$

Това е в сила, ако е изпълнено условието  $\frac{Y-b}{a} \leq 10$ .

Ако това не се изпълнява се подбира отново. Ако числото  $n$  се получи дробно, се закръгля до най-голямото близко цяло число. Размерите на контура, в който се вписва резистора се определя, както следва:

$$17) X = n(a+b) \quad ; \quad Y = \frac{l_{av} - an}{n}$$

$$18) S = XY = \frac{a+b}{l_{av} - an}$$

При горните изчисления се взема предвид, че мястото на завой на меандъра, електрическото поле се разпределя неравномерно.

При проектиране на размерите на “змиевиден” резистор използваме следните формули, като имаме предвид, че основната десегментирана форма, която се повтаря  $n$ -пъти е “S”-образно звено.

$$19) K_{\phi} = \frac{1,57}{\ln \frac{r_1}{r_2}}$$

$$20) R = R_s \frac{X}{r_2(1+m)} \left[ \frac{3,14}{\ln m} - \frac{2m}{m-1} + \frac{Y}{r_2(m-1)} \right]$$

$m = r_1/r_2$  ,  $X$  и  $Y$  са геометрични размери на площта.

$$21) n = \frac{X}{r_1 + r_2}$$

Ако си изберем отношението  $m$  и решим уравнение 20) спрямо  $r_2$ , то се получава

$$22) b = r_1 - r_2$$

При аналитична оценка на грешката свързана с конструкцията и технологията на слойните резистори (ф-ла б) е удобно да се използват следните изрази

$$23) \gamma_{R_s} = \frac{\Delta R_s}{R_s} 100\%$$

$$24) \gamma_{R_{\Delta}} = 2 \frac{1 + \frac{\Delta l}{b} \frac{K_{\phi} \Delta b}{\Delta b}}{\frac{\Delta b}{b}} 100\%$$

$$25) \gamma_{R_t} = TKR(T - 20^{\circ}C) 100\%$$

$TKR$  - температурен коефициент на резистивния слой [ $1/C^{\circ}$ ]

$T$  - максимална работна  $t^{\circ}$  на резистора

$$26) \gamma_{R_k} = \frac{2R_k}{R} 100\%$$

Важен въпрос при проектиране на слойни резистивни елементи е избор на подходяща площ на контакта между резистивния и проводящия слой с цел да се минимизират преходното контактно съпротивление  $R_k$  и работната  $t^{\circ}$  на контакта, така че да няма електрокорозионни ефекти изменения в морфологията на слоевете , металургичен преход на твърди фази, напукване и отлепване на слоевете и др. необратими дефекти. Затова трябва да се определят следните величини:

$$27) R_{k \min} = \frac{\sqrt{R_s \rho_k}}{b}$$

$R_s$  - листово съпротивление [ $\Omega/\square$ ]

$\rho_k$  - специфично преходно съпротивление на контакта [ $\Omega/mm^2$ ]

$b$  - ширина на резистора [mm]

$$28) R_{Kdop} = \frac{\gamma_{Rk} R}{2} ; R - \text{номинал на резистора } [\Omega]$$

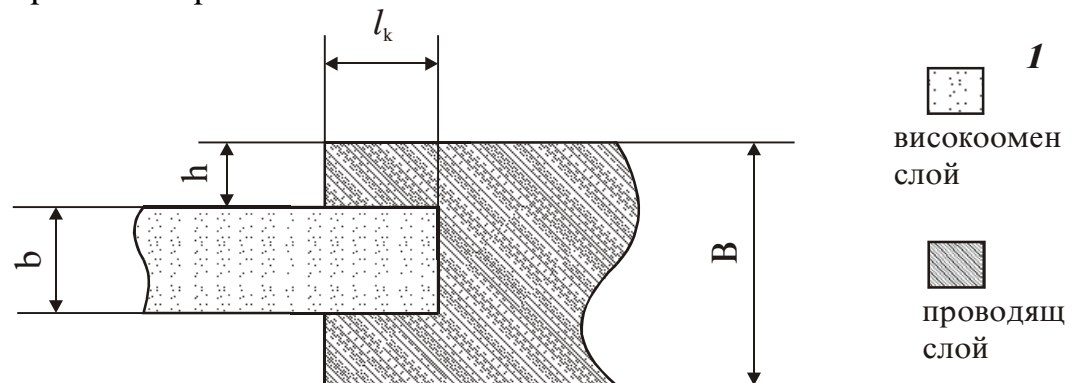
$\gamma_{Rk}$  - относителна грешка на съпротивлението на резистора от преходните контакти (1-3%)

Трябва да се спазва условието, че  $R_{kmin} < R_{kdop}$ . Ако условието не се изпълнява, се подбира по-голяма ширина на резистора  $b$ , или се прави уширение в областта на контакта (фиг. 8.2 а).

$$29) l_{kmin} \geq 1,5 \sqrt{\frac{\rho_k}{R_s}} ; h > \Delta b + \eta ; l_k \geq l_{kmin} + \Delta l + \eta ; B \geq b + 2(\Delta b + \eta)$$

$\Delta l$ ,  $\Delta b$  - грешки при геометричните размери обусловени от технологичното изготвяне

$\eta$  - грешки от разсъвместяване



**Фиг. 8.3. Конструктивни параметри на преходни контакти.**

В пряка връзка с морфологичната структура на резистивните слоеве, техния състав, преходните контактни съпротивления и общата геометрична площ на резистора, са наличието на паразитни шумове.

$$30) U_{noise}^2 = \frac{c}{Sd} U_{eff}^2 \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right) \text{ напрежение на собствените шумове}$$

$$31) N_F = 20 \lg\left(\frac{U_{noise}}{U_{eff}}\right), dB$$

$\Delta f = f_2 - f_1$  - честотна лента на работа

$c$  - коефициент зависещ от състава на резистивния материал

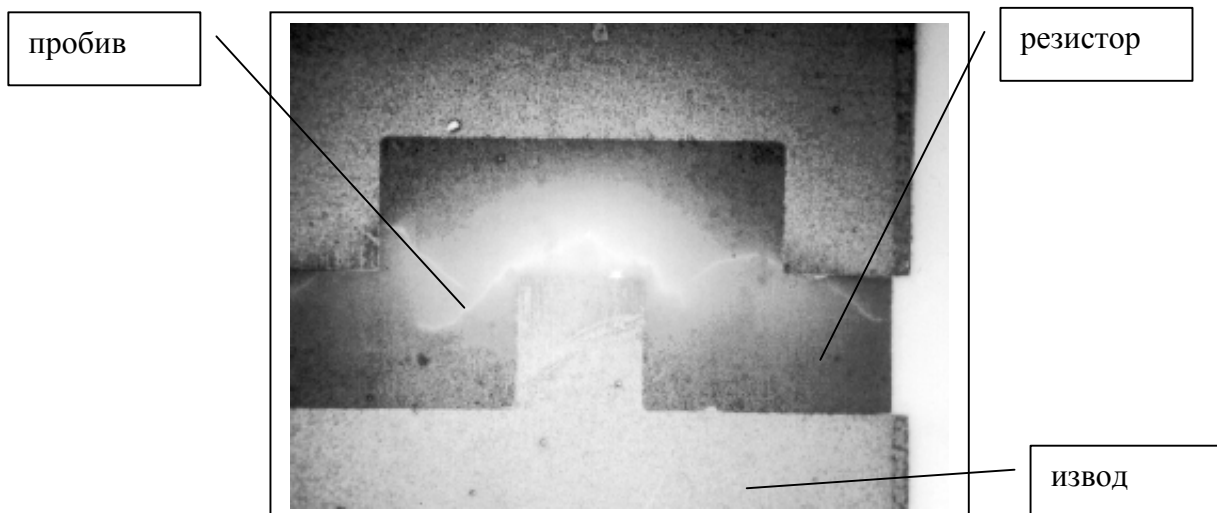
$d$  - дебелина на резистивния слой

$S$  - обща площ на повърхността на резистивния слой и преходните контакти

$U_{eff} = V + U_{in}$ ;  $V$  - постоянно-токово напрежение

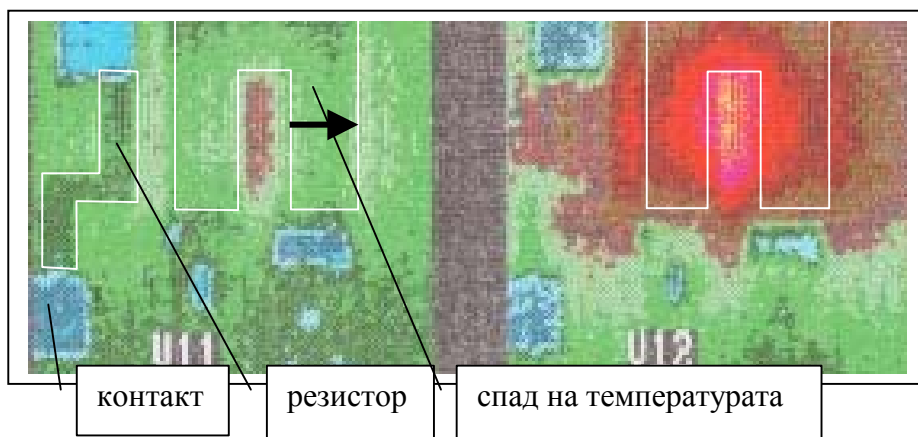
$U_{in}$  - входно променливо-токово напрежение.

При топологичното проектиране трябва да се отчитат и такива елементи като пикове в напрежението и топлинно прегряване. На фигура 8.4 е показан пробив на тънкослоен резистор в резултат на висока напрегнатост на полето в резистора.



**фиг. 8.4 Пробив в тънкослоен резистор при повишено напрежение**

На фигура 8.5 е показано изображение на резистор с меандровидна форма “П” при различно натоварване по мощност. Снимката е направена с инфрачервена камера. Вижда се че вътрешната част на резистора се загрява на по-висока температура.

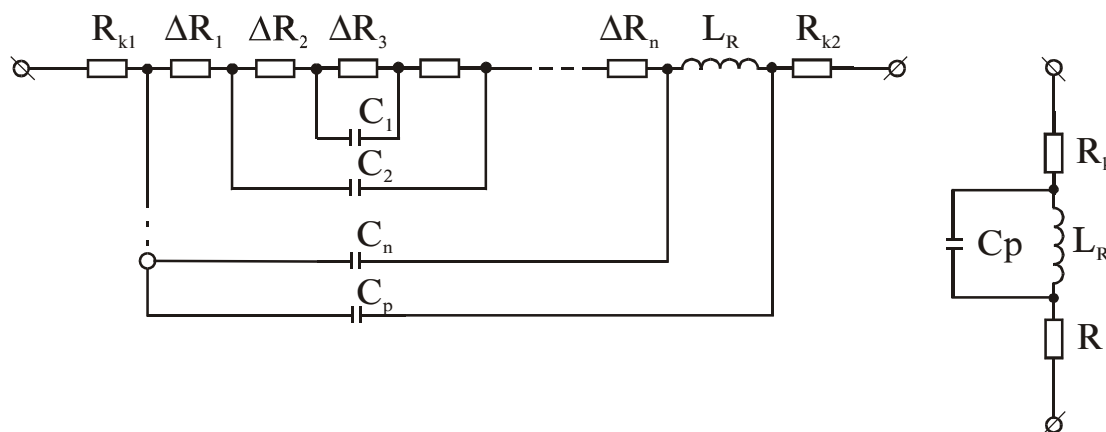


Термовизионно изображение на резистор натоварен с различна мощност. Вътрешна част с повишена температура.

**фиг. 8.5. Загряване на резистори при различна мощност**

Собствените шумове на дебелослойните резистори са доста по-големи от тези на тънкослойните. Това се дължи на наличието на метални диелектрични окиси в състава на дебелослойните пасти и преходните фазови състояния, дължащи се на частични контакти между отделните микрочастици от метал и диелектрик. Това обуславя и частични полупроводникови ефекти, които се наблюдават при провеждане на ток през такива структури (тунелиране на  $e^-$  и остатъчни свободни йони) и наличието на електронен и топлинен шум. Дебелослойните резистори

имат отявлена аморфна структура, докато тънкослойните - по-близо до поликристалната или кристална структура на чистите обемни метали (по-ниско ниво на собствения шум). Може да се предложи следната еквивалентна схема за повишени честоти на слоен резистор с отчитане и на влиянието на неговата микроструктура.



**Фиг. 8.6. а) Еквивалентна схема на слоен резистор за високи честоти;  $\Delta R_i$ ;  $\Delta C_i$  - параметри на резистивните микрочастици,  $L_R$ ,  $C_p$  - общи разпределени индуктивност и капацитет,  $R_{k1,2}$  - съпротивление на преходните контакти и контактните площадки; б) Опростена еквивалентна схема.**

За априорна аналитична оценка на паразитните реактивни елементи от горната фигура могат да се използват следните формули:

$$32) C_p = 0,0241 \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \frac{l}{\lg \frac{4l}{b}} ; [pF]$$

$\epsilon_1$  - диелектрична проницаемост на подложката

$\epsilon_2$  - диелектрична проницаемост на херметизирация материал

$$33) L_R = 0,02l \left( 2,31 \lg \frac{2l}{b} + 0,2235 \frac{b}{l} + 0,5 \right) ; [\mu H]$$

Граничните честоти за нормална работа без паразитни резонанси на нискоомни (по-малки от  $300\Omega$ ) и високоомни (по-големи от  $300\Omega$ ) слойни резистори могат да се определят съответно по следните формули:

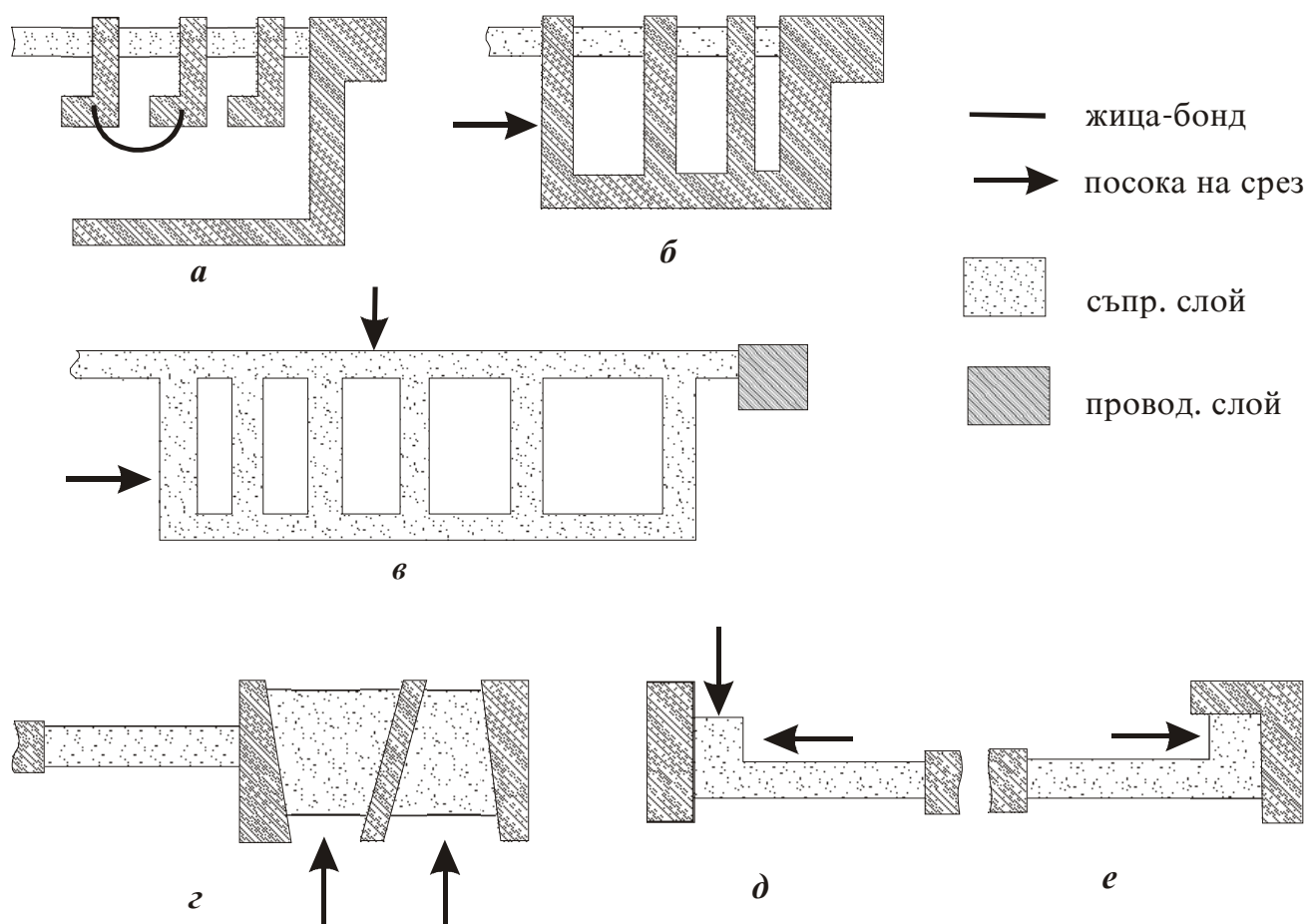
$$34) f \leq 0,1 / RC_p \quad 35) f \leq R / 62,8L_R$$

Друг важен момент при проектиране конструкцията на слойни резистори е подбора на подходящи топологични конфигурации за осъществяване на процеса “настройка”. Тя може да бъде плавна и дискретна, с по-голяма или по-малка относителна промяна на стойността на настройвания резистор. Освен това стойността на настройвания



елемент може да бъде измервана статично (просто R-измерване) или динамично. При втория начин, елементът е включен в еталонна филтрова структура с основен резонанс, чиито параметри се следят (резонансна честота, фаза, Q-фактор). При плавната настройка е характерно увеличаване на стойността на резистора, в зависимост от дължината на среза, неговото местоположение по дължината на елемента и неговата ориентация. В общи линии може да се каже следното:

- Напречните срезове предизвикват по-голямо относително увеличение на стойността на резистора отколкото надлъжните. При тях също настройката е по-стръмна;
- При по-големи дължини на срезовете се достига до по-големи увеличения на стойностите;
- Колкото надлъжния срез е по-близко до центъра на резистора, толкова увеличението е по-голямо и по-стръмно;
- Колкото напречния срез е по-близко до контактните площадки, толкова увеличението е по-малко и по-плавно.



**Фиг. 8.7. Различни конструкции на настройваеми резистори. От а) до в) - дискретна настройка. От г) до е) - плавна настройка.**

**8.2. Проектиране на слойни реактивни L, C елементи със съсредоточени и разпределени параметри при МСМ за повишени честоти.**

Според определението дадено в 4-та глава, слойните реактивни елементи са двумерни компоненти, т.е. дебелината на проводящите слоеве от които са изготвени, са много по-малки от  $\lambda/4$  четвърт дължина на вълната в материала на подложката). Когато тяхната топологична ширина (W) и дължина (L) са също по-малки от  $\lambda/4$ -те се наричат елементи със съсредоточени параметри, а когато станат съизмерими с  $n\lambda/4$  и  $n\lambda/2$  - се превръщат в елементи с разпределени параметри или многорезонансни периодични структури ( $n=1,2,3 \dots$ ).

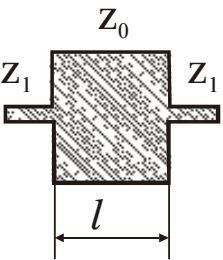
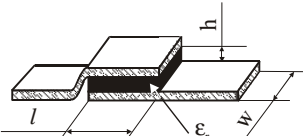
**1. Планарни елементи със съсредоточени параметри.**

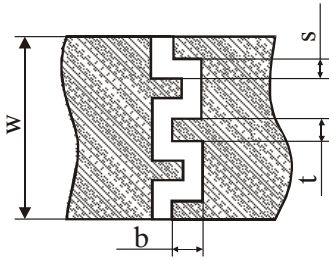
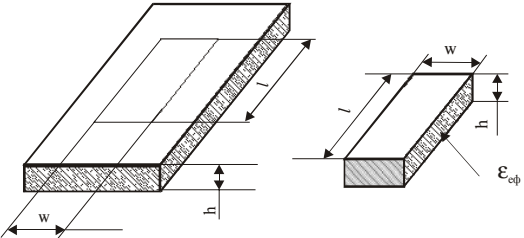
По правило те работят на честоти много по-ниски от честотата на първия си собствен резонанс и имат геометрични размери, не по-големи от  $(0,01 - 0,03) \lambda$ . При такива малки размери, могат да се пренебрегнат ефектите, обусловени от вълновия характер на ЕМ полето и преместването му по фаза между входа и изхода на елемента. За предпочитане е да се изготвят върху изолационни материали с ниска диелектрична проницаемост, където скъсяването на вълната не е толкова силно.

$$36) \lambda_{\lambda} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad \lambda_o = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m / sek}}{f [\text{Hz}]} - \text{дължина на вълната във}$$

вакуум.

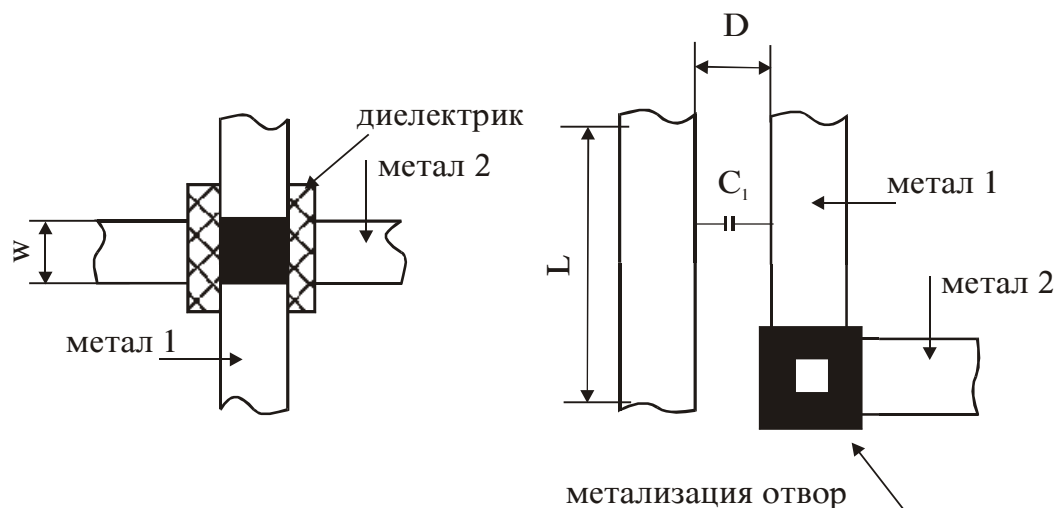
**A. Кондензатори.**

<p>Отрязък от предавателна линия еквивалентна на паралелен кондензатор</p> 	$C [F.] \approx \frac{1}{z_0} \frac{l \sqrt{\epsilon_{ef}}}{c}$ $Z_0 [\Omega], l [m], c = 3 \cdot 10^8 \text{ m / s}$
<p>последователен кондензатор в предавателна линия (тип МЛЛ)</p> 	$C [pF] = 0.885 \epsilon_r \omega l / h$ $\omega [cm], l [cm], h [cm]$

<p>планарен гребенчат кондензатор</p> 	$C[pF] = (\epsilon_r + 1)\epsilon_0 b [2A_1 \times (N - 1) + A_2]$ $A_1 = 0.614(h/s)^{0.25} (t/h)^{0.439}$ $A_2 = 0.775t / (2N - 1)(t + s) + 0.408$ <p><math>N</math> – брой секции,  <math>h</math> – дебелина на подложката</p>
<p>плосък кондензатор върху материала на подложката</p> 	$C[F] = C_0 + 2C_{k1} + 2C_{k2}$ $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \omega \ell / h$ $C_{k1} = (\epsilon_0 \ell / 2) [120\pi Z_0(\varpi, h, 1) / z_0^2(\omega, h, \epsilon_r) - \epsilon_r \omega / h]$ $C_{k2} = (\epsilon_0 \varpi / 2) [120\pi Z_0(\ell, h, 1) / Z_0^2(\ell, h, \epsilon_r) - \epsilon_r \ell / h]$ <p><math>\ell[m], \omega[m], h[m]</math></p>

**Табл. 8.8. Основни типове планарни кондензатори с “квазисъсредоточена → а) и съсредоточени параметри → б) ÷ г)**

Най-големи номинални стойности (десетки пикофарада) могат да се достигнат с конструкцията на МИМ кондензатора от табл. 8.6 б) При него активната площ на елемента се определя от геометрията на горния електрод. За получаване на високи стойности на  $\epsilon_r$  и пробивното напрежение на изолиращия материал, често пъти се използват многослойни диелектрици. Освен това, чрез промяна на площта на горния метален електрод (изрязване на участъци от него или присъденяване на такива) може да се постигне ефект на частична дискретна настройка. В многослойните МСМ-структури, пресичането на проводящи шини от различни нива, може също да изпълнява тези функции.



**Фиг. 8.9. Конфигурация на кондензатори, получени при пресичане на проводящи шини от различни нива в МСМ или паралелни линии в своята траектория**

$$36) C = (L \times W) \cdot (C_{pa} + P) \cdot C_{pn}$$

$$37) C_1 = L \cdot K \cdot 1/D$$

$K$  - капацитивен коефициент;

$C_{pa}$  - капацитет на единица площ;

$C_{pn}$  - капацитет на единица периметър;

$P$  - периметър.

$Q$  - фактор на МИМ кондензатора от табл. 7.6.б) може да бъде изчислен по следната формула:

$$38) \frac{1}{Q_c} = \frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_d}; Q_s = \frac{3W}{2\omega C l^2 R_s} \text{ - } Q \text{ фактор на метализацията}$$

$$Q_d = \frac{1}{tg\delta} \text{ - } Q \text{ фактор на диелектрика}$$

$R_s$  - листово съпротивление

$\omega$  - кръгова работна честота.

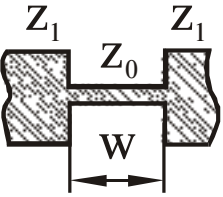
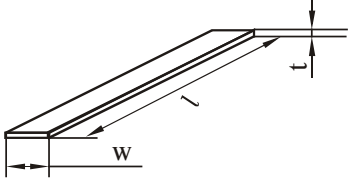
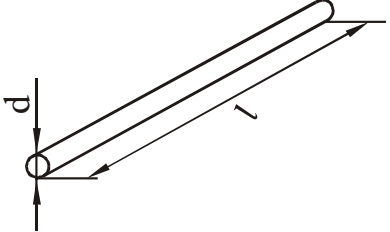
С конструкцията на кондензаторите от табл. 7.6 в), г) се достигат доста по-ниски номинални стойности (от десети части до единици пикофарада). Предимство при тях е простото технологично изготвяне (една фотолитография на метализацията за формиране на топологията), те са разположени в една равнина и също подлежат на частична настройка.  $Q$ -фактора на гребенчатия кондензатор от табл. 7.6 в) може да се изчисли по следната формула:

$$39) Q_c = \frac{1}{\omega CR} ; R = \frac{4}{3} \frac{bR_s}{N \cdot t}$$

$\omega$  - кръгова честота;  $N$  - брой секции;  $t$  - ширина на един зъб.

За изчисляване на кондензатора от табл. 7.6г) се използват формулите за намиране вълновото съпротивление на микролентови линии при окачествяване на краевите ефекти ( $S_{k_1}$  и  $S_{k_2}$ ). Предполага се, че дадената структура се възбужда откъм страна  $W$  и откъм страна  $l$ , за да се получи разпределението на ЕМ полето и в двете посоки. Обикновено такива елементи се имитират от контактни площадки върху самата диелектрична подложка-носач (обратната страна е метализирана). Точността е около 2%, ако се спазва ограничението  $h \leq 2W$ .

**Б. Индуктивни елементи.**

Видове индуктивни елементи	Формули за изчисление
<p><b>а)</b> отрязък от предавателна линия със свойства на последователна индуктивност</p> 	$L[nH] \approx Z_0 \ell \sqrt{\epsilon_{ef}} / c$ $Z_0 > Z_1$ $c = 3 \cdot 10^{11} \text{ mm/s}, \ell [\text{mm}], Z_0 [\Omega], \ell < \lambda/8$
<p><b>б)</b> плосък правоъгълен проводник</p> 	$L[nH] = 0.2 \ell [\ln(\ell / \omega + t) + 1.19 + 0.22(\omega + t)/t]$ $\omega [\text{mm}], t [\text{mm}], \ell [\text{mm}]$
<p><b>в)</b> цилиндричен проводник</p> 	$L[nH] = 0.2 \ell [\ln(\ell / d) + 0.386]$ $d [\text{mm}], \ell [\text{mm}]$

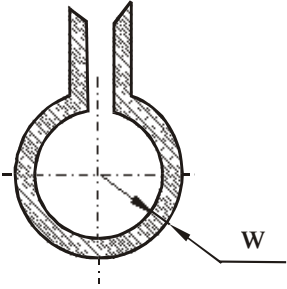
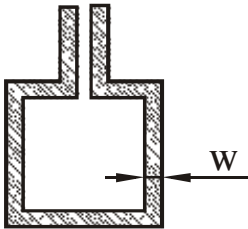
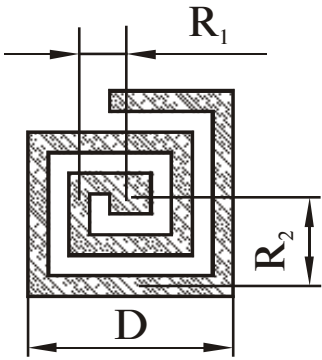
<p>з) кръгла навивка</p> 	$L[nH] = 0.2\ell[\ln(2\ell/(\varpi + t)) - 2.451]$ <p><math>\ell</math> – периметър, (mm);  <math>\varpi</math> и <math>t</math> дебелина на витката в (mm)</p>
<p>д) квадратна навивка</p> 	$L[nH] = 0.2\ell[\ln(2\ell/(\varpi + t)) - 2.853]$ <p><math>\ell</math> страна на квадрата в [mm],  <math>\varpi</math> и <math>t</math> ширина и дебелина на витката</p>
<p>е) плоска квадратна навивка</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) <math>L[nH] = 2,41aN^{5/3} \ln(8a/c)</math></li> <li>2) <math>L[nH] = 8,5S^{1/2}N^{5/3}, (R_1 = 0)</math></li> <li>3) <math>L[nH] = 0,27 \frac{D^{8/3}}{\rho^{5/3}} \frac{1}{(1+q/\rho)^{5/3}}</math></li> </ol> <p><math>a = (R_1 + R_2)/2</math>, <math>c = R_2 - R_1</math>, <math>S</math> - площ в [sm<sup>2</sup>],  <math>\rho</math> - ширина на витката в [mm],  <math>q</math> - ширина на процепа в [mm],  <math>D</math> – страна на квадрата в [mm]</p>

Табл. 8.10. Основни видове плоски индуктивни елементи. а) с квазисъсредоточени параметри; б) до е) със съсредоточени параметри.

С помощта на лентов проводник (табл. 8.10.б)) и свързваща жица (табл. 8.10.в)) могат да се реализират малки номинални стойности, до единица нанохенри. Тяхното използване се улеснява от факта, че

конструктивни елементи от ИС като отрязъци от свързващи проводящи шини или бондиращи жици могат да имитират индуктивности. За повишени честоти, стойността на индуктивностите намалява, вследствие на влияние на скин-ефекта и наличието на близко разположени заземени плоскости. Това може да бъде отчетено чрез коригиращ коефициент  $K_g$  (за плоски лентови проводници) по формула 40):

$$40) L_{eff} = L \cdot K_g \quad ; \quad K_g = 0,57 - 0,145 \ln\left(\frac{W}{h}\right)$$

$h$  - разстояние от заземени плоскости

$W$  - ширина на линията

41)

$$L_w = 0,2l \left\{ \ln \frac{4h}{d} + \ln \left[ \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2 / 4}}{l + \sqrt{l^2 + 4h^2}} \right] + \sqrt{1 + \frac{4h^2}{l^2}} - \sqrt{1 + \frac{d^2}{4l^2}} - \frac{2h}{l} + \frac{d}{2l} \right\}$$

$d$  - диаметър на жицата,  $h$  - разстояние до заземени плоскости,  $l$  - дължина на жицата.

Във формула 41) се отчита влиянието на паралелни заземени плоскости върху номиналните стойности на жична индуктивност.  $Q$ -факторите на индуктивен плосък лентов и обемен цилиндричен проводник могат да бъдат изчислени съответно чрез следните изрази:

$$42) Q_L = \frac{\omega L}{v R_s l / 2(\omega + t)} \quad \text{- за плосък проводник}$$

$v$  - поправъчен коефициент, отчитащ неравномерното разпределение на токовете линии от скин-ефекта (1,4 до 2);

$\omega$  - кръгова честота.

$$43) Q_L = 3,38 \cdot 10^3 \sqrt{f / 2q} (Ld / l) \quad \text{- за кръгъл проводник}$$

$f$  - честота GHz;

$q$  - относително специфично състояние на дадения метал спрямо медта (за злато  $q = 1,41$ , за Al -  $q = 1,52$ )

Плоските кръгли и квадратни спирални конструкции на индуктивности се използват за достигане на високи номинални стойности (стотици нанохенри). Ако се използват меки магнитни материали за подложки (ферити) могат да се реализират и стойности от порядъка на микрохенри. Могат да се формулират следните моменти при тяхното проектиране:

- Ширината на линията от спиралата трябва да е възможно най-голяма, а в същото време външния диаметър трябва да се запазва относително неголям. Това означава, че при намаляване на междувитковото разстояние се увеличава паразитният капацитет  $C_o$ . Освен това се затруднява технологичното изготвяне и опасността от късо

съединение между съседни линии при електрохимично удебеляване на метала на спиралата.

- Практическите изследвания са показали, че за да се достигне до копромис спрямо гореспоменатото съображение и максимален Q-фактор, трябва да се подбира отношение външен към вътрешен диаметър от 3-5.

- Доказано е, че при едни и същи геометрични размери кръглите спирали имат по-малки номинални стойности, но по-висок Q-фактор от квадратните.

- При увеличаване на работната честота се увеличава излъчването на електромагнитна енергия, появява се съпротивление на излъчване (антенен ефект) и от една честота нататък Q-факторът започва да намалява:

$$44) Q_L = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot W \cdot N (d_2 + d_1) \sqrt{f / 2q}}{v' \sqrt{15d^2 - 7d_1}} - \text{Q-фактор на спирала}$$

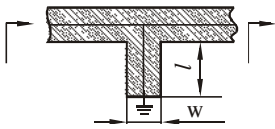
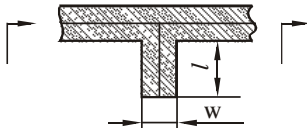
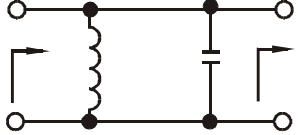
$$d_1 = 2R_1 \quad ; \quad d_2 = 2R_2 \quad ; \quad f - \text{честота [GHz]}$$

$$v' - 1 \text{ до } 1,5 \text{ (избира се по графики)}$$

## 2. Планарни елементи с разпределени параметри.

При тях геометричните размери  $W$  и  $L$  са съизмерими с дължината на вълната в дадената материална диелектрична среда. Те представляват предимно отрязъци от микролентови линии с различни дължини, които се наричат “шлейфове”, могат да имат най-различна топологична конфигурация и са разположени или на повърхностния слой или в междинните изолационни слоеве в общия обем на дадена МСМ структура. Използват се предимно за високи честоти (над 1G Hz) и основните параметри, които ги характеризират са вълново съпротивление  $Z_0$ , електрическа дължина и входен импеданс  $Z_{in}$ . Могат да имитират L, C елементи, последователни и паралелни трептящи кръгове (резонатори), плоски антени, в зависимост от работната честота и стойностите на своите основни параметри. При подходящи комбинации между тях се изграждат филтри, вериги за връзка и захранване, съгласуващи вериги и др. Характерно за тях е, че са периодични многорезонансни структури в широки честотни ленти. Обикновено единия или двата края на тези отрязъци от линии са окъсени или отворени, или единия е окъсен, другия отворен, за да имитират различни елементи.



Топологичен елемент	Еквивалентна електрическа схема	Изчисляване
<p>1. Паралелен окъсен в единия край шлейф. Геометрична дължина <math>l \ll \lambda_d/4</math></p>  <p><math>Z_o, \Theta, Z_{in}</math></p>	<p>Паралелна индуктивност</p>  <p><math>X_L = j\omega L</math></p>	<p><math>Z_{inlc} = jZ_o \text{tg}\Theta</math> <math>jX_L = j\omega L = jZ_o \text{tg}\Theta</math></p>
<p>2. Паралелен отворен в единия край шлейф. Геометрична дължина <math>l \ll \lambda_d/4</math></p>  <p><math>Z_o, \Theta, Z_{in}</math></p>	<p>Паралелен капацитет</p>  <p><math>X_C = -j / \omega C</math></p>	<p><math>Z_{inlx} = -jZ_o \text{ctg}\Theta</math> <math>-jX_C = -j / \omega C = -jZ_o \text{ctg}\Theta</math></p>
<p>3. Паралелен отворен шлейф <math>l = n \cdot \lambda_d/4</math>; <math>n = 1, 3, 5</math></p>  <p><math>Z_o, \Theta, Z_{in}</math></p>	<p>Паралелно включен паралелен трептящ кръг</p> 	<p><math>Z_{inlc} \rightarrow \infty</math> ИЛИ <math>Y_{inlc} \rightarrow 0</math></p>
<p>4. Паралелен отворен шлейф</p>	<p>Паралелно включен последователен трептящ</p>	<p><math>Z_{innp.x} \rightarrow 0</math> ИЛИ <math>Y_{inn.x} \rightarrow \infty</math></p>

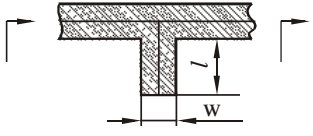
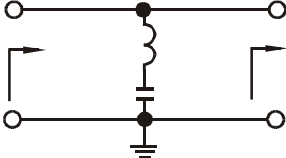
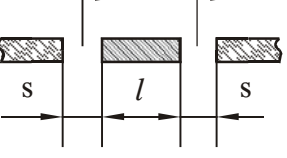
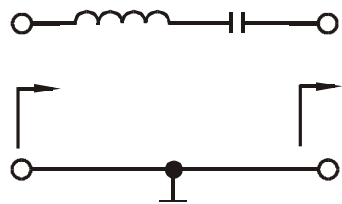
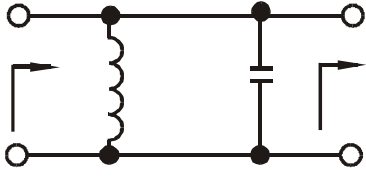
 <p><math>l = n \cdot \lambda_d / 4; n = 1, 3, 5</math></p>	 <p>кръг</p>	
 <p>5. Последователна линия <math>l = n \cdot \lambda_d / 2; n = 1, 3, 5</math></p> <p><math>Z_o, \Theta, Z_{in}</math> Процепите в линията играят ролята на капацитивна връзка с останалия предавателен тракт</p>	<p>а) Последователно вкл. последователен трептящ кръг (импеданс)</p>  <p>б) Паралелно вкл. паралелен трептящ кръг (адмитанс)</p> 	<p>а) <math>Z_{in n.x.} \rightarrow 0</math> б) <math>Y_{in n.x.} \rightarrow \infty</math></p>

Табл. 8.11. Основни планарни елементи с разпределени параметри

45)  $\Theta = \frac{360^\circ l}{\lambda_\Lambda}$  - електр. дължина

46)  $\lambda_\Lambda = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{eff} \mu_{eff}}}$  ;  $\lambda_o = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m / sek}}{f[\text{Hz}]}$

$\lambda_\Lambda$  - дължина на вълната в линията;

$\mu_{eff} = 1$  при чисти диелектрици

$\epsilon_{eff} = f(\epsilon_r, W, h, t)$

- W - ширина на линията

- t - дебелина на метализацията

-  $h$  - дебелина на подложката - носач (или на диелектричния слой при МСМ)

$\epsilon_r$  - диелектрична константа на материала

#### ЗАБЕЛЕЖКА:

Вълновото съпротивление  $Z_0$  на тези линии е също функция на геометричните размери и физически параметри на материалите, които ги изграждат  $[Z_0 = Z_0(W, h, \epsilon_r, t)]$ . Той не трябва да се бърка с електрически импеданс  $\dot{Z}_{in,out}$ , а в общия случай представлява отношението  $E/H$  за вида ЕМ поле, което се разпространява в линията.

При работа с елементи с разпределени параметри се предпочитат диелектрични изолационни материали за подложки и междуслойна изолация с високо  $\epsilon_r$ . Това води до скъсяване дължината на вълната  $\lambda_L$  в линията и до по-малки геометрични размери на елементите, но от друга страна се увеличават дисперсионните свойства на системата, диелектричните загуби, критичността на технологичните толеранси и размерите и по-големите грешки, произтичащи от тях, както и силно увеличение на паразитните влияния между близко разположени елементи.

### 8.3. Скрити (погребани) пасивни слойни елементи в многослойни МСМ структури.

Те представляват пасивни компоненти, които се изготвят в отделните изолационни слоеве в общата многослойна МСМ структура. Номенклатурата от тези елементи са планарните слойни R,L,C елементи, микролентови предавателни линии, котактни площадки и метализирани отвори за връзка между линиите от различни нива. Относно конструктивните параметри на горепосочените елементи, няма особена разлика при тяхното изчисляване, от това което беше изложено в предишните раздели. Новото тук е отчитането на една комплексна диелектрична проницаемост получена от комбинацията на различните изолационни слоеве (различни дебелини и  $\epsilon_r$  в най-общия случай). Това обстоятелство оказва най-силно влияние върху константата на разпространение, вълновото съпротивление, дължината на вълната и коефициентите на паразитна ЕМ-връзка между съседни елементи- По-важното в случая е да се извърши така нареченото “технологично спрягане” на слоевете, изграждащи тези скрити елементи в следните насоки:

- подбор на съизмерими ТКЛР на слоевете;
- металургична съвместимост, с цел да се избягват електрокорозионните микродефекти;

- стремеж към технологично редуциране на остатъчни газове, влага и свободни йони, за да се минимизира електромиграцията между съседни метални шини и площадки;

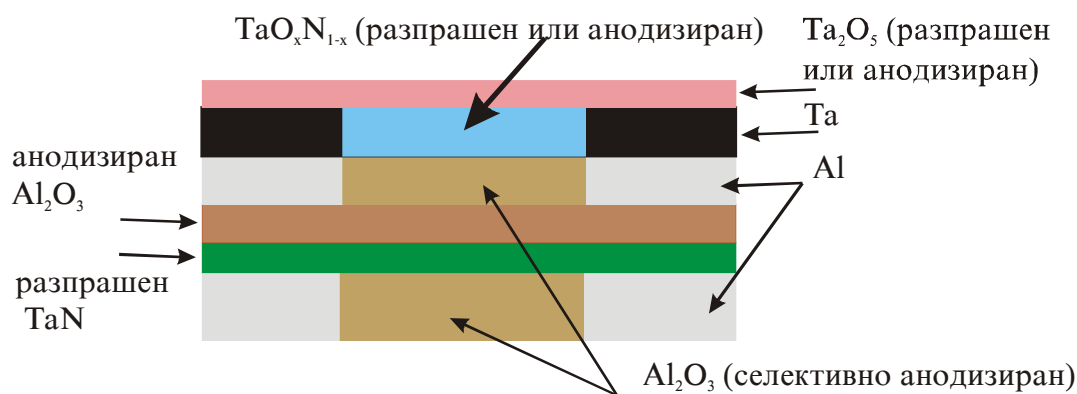
- гъвкавост при конструктивното и топологично проектиране, за да се елиминират геометричните разсъвместявания на елементите при изготвянето им;

- подбор на подходящи технологии и материали.

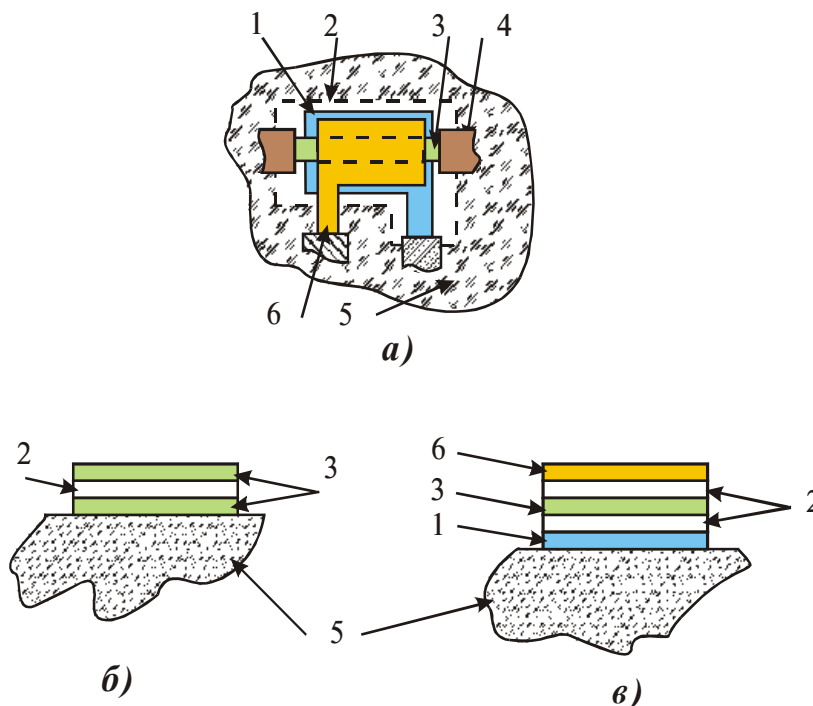
Ще разгледаме следните технологични процеси, за изготвяне на такива скрити елементи в обема на МСМ - тънкослойна танталова технология, дебелослойна нискотемпературна листова керамична технология и метализация на отвори в хибридни МСМ (D).

### 1. Танталова технология в тънкослойни МСМ (D).

Тази технология позволява чрез прилагане на йонно-плазменото реактивно разпрашване, при използването на една и съща мишена от Та, да се получават проводящи Та слоеве, резистивни от ТаN и диелектрични от Та<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, в единен технологичен цикъл, без развакуумиране на камерата. Освен това Та е метал, който много успешно може да се анодизира електрохимично и да образува ТаO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>, а слоевете от ТаO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> са резистивни, при които чрез дозиране на парциалното налягане на газовете O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> във вакуумната камера се достига до листови съпротивления с различни стойности. Този ефект се наблюдава и при прилагането на мокра електрохимична анодизация. От всичко казано до тук става ясно, че Та технологията успешно може да създава многослойни системи с “погребани” R и C, които се наричат още структури с разпределени параметри.



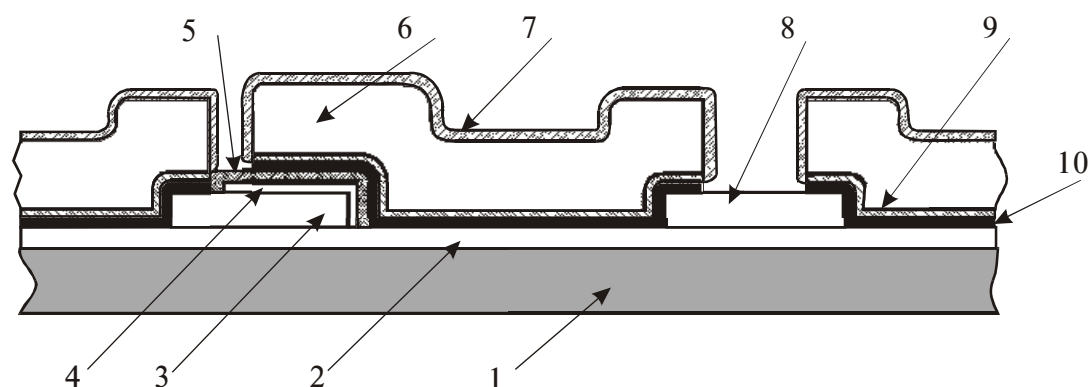
**Фиг. 8.12.** Примерна съчетана технология за МСМ (D) използваща селективна анодизация на Та и Al, или йонно реактивно разпрашване на ТаN, ТаO<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>, Та<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.



**Фиг. 8.13. Конструктивни варианти на тънкослойна RC структура с разпределени параметри: а) поглед отгоре на C-R-NC структура; б) R-C-NR структура в разрез; в) C-R-NC в разрез: 1 - долен електрод на кондензатора, 2 - диелектрик, 3 - резистивен слой, 4 - контактна площадка, 5 - подложка, 6 - горен електрод на кондензатора.**

В общи линии една типична Ta-технология за тънкослойни ВЧ ХИС включва следните процеси:

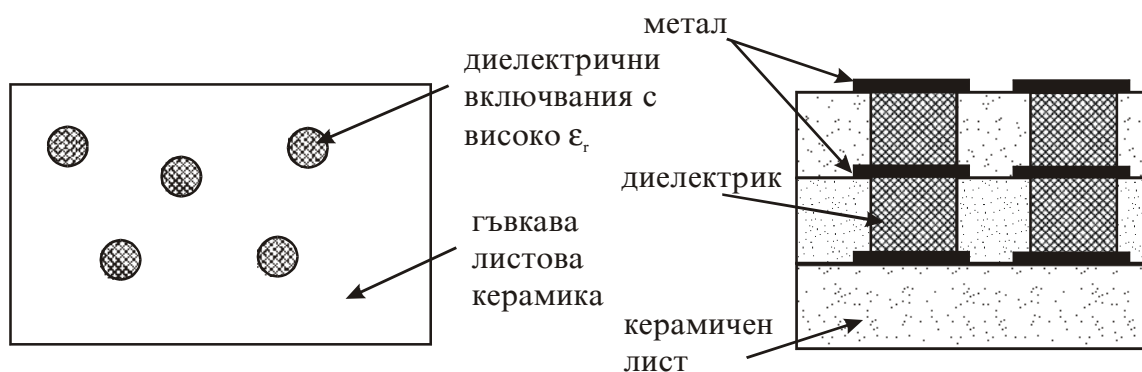
- Нанасяне на грундово устойчиво покритие от  $Ta_2O_5$  (2) върху подложката (1);
- Нанасяне на слой от TaN (8) за формиране на резистори (фотолитография и ецване)
- Нанасяне на слой от Ta (3) за долни площадки на кондензатори (фотолитография и ецване)
- Нанасяне на слой от  $Ta_2O_5$  (4) за диелектрик на кондензатори (фотолитография и ецване), възможност за допълнителен диелектрик (5) като силициев моноокис или дрег за промяна на капацитета
- Нанасяне на слой (9) от Au с подслой от Ti (10) за горни електроди на кондензатора, контактни площадки, адхезионен подслой (фотолитография и ецване на Au )
- Нанасяне на електрохимична мед (удебеляване) (6) по рисунката на златото с използване на Ti подслой за електрически токопроводящ контакт, без той да се галванизира и нараства.
- Нанасяне на антикорозионно покритие от Ni/Au (7) върху медта
- Фотолитография и ецване на подслоя от титан (10)



**Фиг. 8.14. Типична Та - технология за ХИС.**

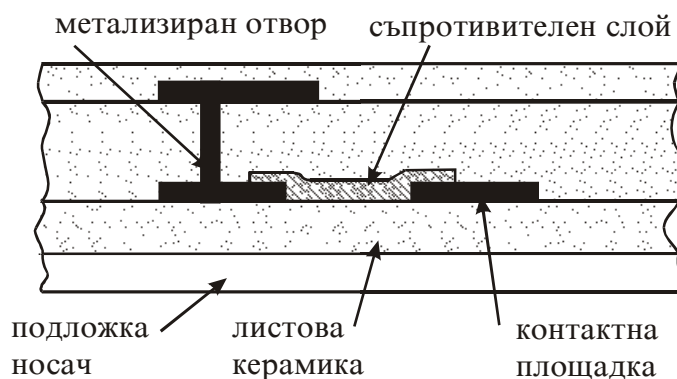
2). Дебелослойна технология, използваща листова и гъвкава многослойна керамика (LTCC).

Тази технология е една от най-бързите, евтини и надеждни за получаване на скрити R и C дебелослойни елементи. Най-лесно е технологичното изготвяне на резистивни елементи - те се получават чрез ситопечат върху меджинните “гъвкави” керамични листове, които се ламинират и стиковат един върху друг в общ пакет. Тук важното е съблюдаването на съвместимостта между резистивните пасти, пастите за контактни площадки и гъвкавите керамични листове (най-вече в аспект на свиването след изпичането им и запазване на цялостта на слоевете и адхезията между тях). Стратегията при получаване на скрити слойни кондензатори (обикновено те са от типа метал-изолатор-метал или МИМ) е определени участъци от междинните гъвкави керамични листове да бъдат изрязани и след ламинирането им там да се нанесе друга изолаторна диелектрична паста с високо  $\epsilon_r$ . Следват останалите стандартни технологични операции. Горните и долни метални електроди на тези МИМ кондензатори се получават от напечатани контактни площадки върху съответните съвместени места на другите два съседни керамични листа (горен и долен). Когато се натрупат такива структури една върху друга се получават мултислойни МИМ кондензатори с по-високи номинални стойности.



**Фиг. 8.15. Поглед отгоре и напречен разрез на “скрити” МИМ**

### кондензатори.



**Фиг. 8.16. Напречен разрез на скрит резистор.**

Особеността при тази технология (LTCC) е, че тя е дебелослойна технология с нискотемпературно изпичане на гъвкавите керамични листове и се извършва в нормални конвейрни пещи при температура от около 850-900 С , характерни за повечето проводящи и резистивни пасти. Особеността на керамичните листове (наричани още “зелена лентова каремика”) е това, че те са с висока еластичност , дебелина от около 70-100μm и представляват смес от керамичен и стъклен прах със специални свързващи органични полимери (биндери), нанесени чрез адхезиви върху гъвкава органична лента (с температура на топене от около 350-400 С ). Всички операции до изпичането (механична обработка, метализация, събиране в пакет) се извършват върху “суровите” керамични листове. Трябва да се има предвид, че температурата на изпичане на металните, диелектрични и резистивни пасти, нанесени върху листовете, трябва да са по-високи от тази при изпарение или изгаряне на органичните съставки на лентата и биндерите. Ще представим типичен технологичен маршрут на LTCC технология. В търговски вид лентовата керамика се предоставя на готови ролки.

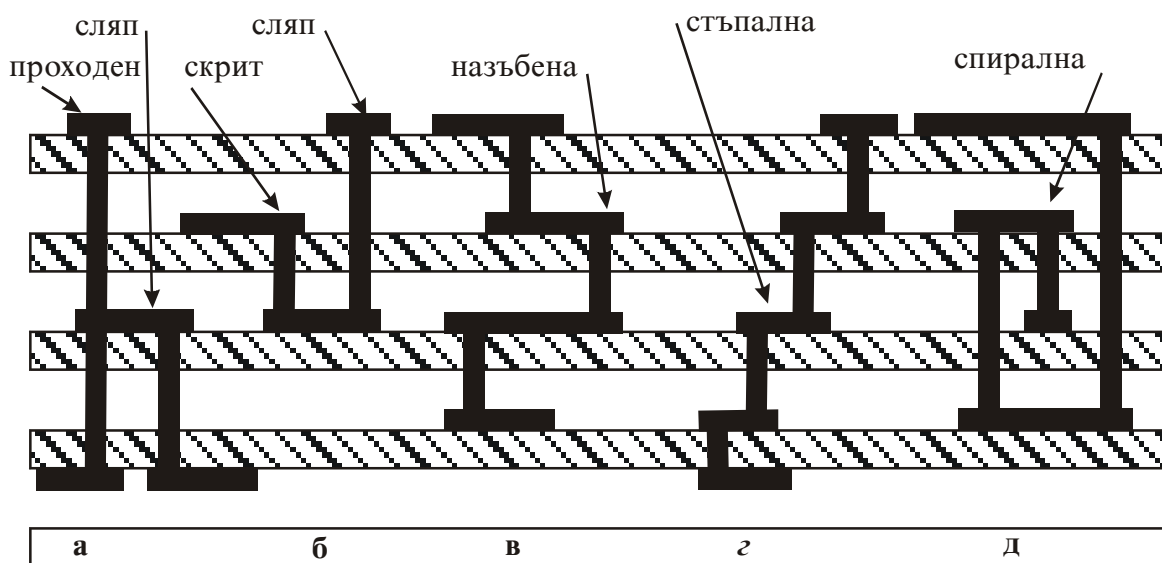
- Развиване на лентата и механичното ѝ разрязване на определени отрязъци според нужните габарити.
  - Механично пробиване на малки отвори в отрязъците.
  - Метализиране на отворите, формиране на проводящи шини, контактни площадки и резистори чрез ситопечат.
    - Изсушаване на отделните листове за 10 min при 120 С.
    - Съвместяване, стиковка на отделните отрязъци в общ пакет (листовете са един върху друг) и ламиниране за 10 min при около 70°С, с натиск 10-20N/mm<sup>2</sup>.
    - Изпарение и изгаряне на органичните съставки при 350°С за 1 час.
    - Високо температурно изпичане в конвейрна пещ за около 120 min с температура на платото 850-900° С, с 15 min задържане в него.

- Ситопечат и изпичане на горните проводници и резистори.
- Тестване и контрол.

Получените мултислоеви от листовата керамика са с високо съдържание на стъкло и имат  $\epsilon_r$  около 5-6. По горепосочената технология могат да се изготвят както изолационни диелектрични слоеве върху обща стандартна керамика-носач ( $96-98\%Al_2O_3$ ), така и самостоятелни подложки от стъклокерамика (GCS).

3). Формиране метализация на отгорите за връзка между проводящите нива в многослойна МСМ (D) структура.

Съществуват най-разнообразни конструкции на метализирани отвори в слоевете на МСМ за формиране на електрически връзки между контактните площадки от съседни или различни нива. Това се налага от сложните топологични конфигурации на тези нива и високата им плътност на опроводяването. Най-критични са ситуацията, когато трябва да се премине от най-горното до най-долното ниво.

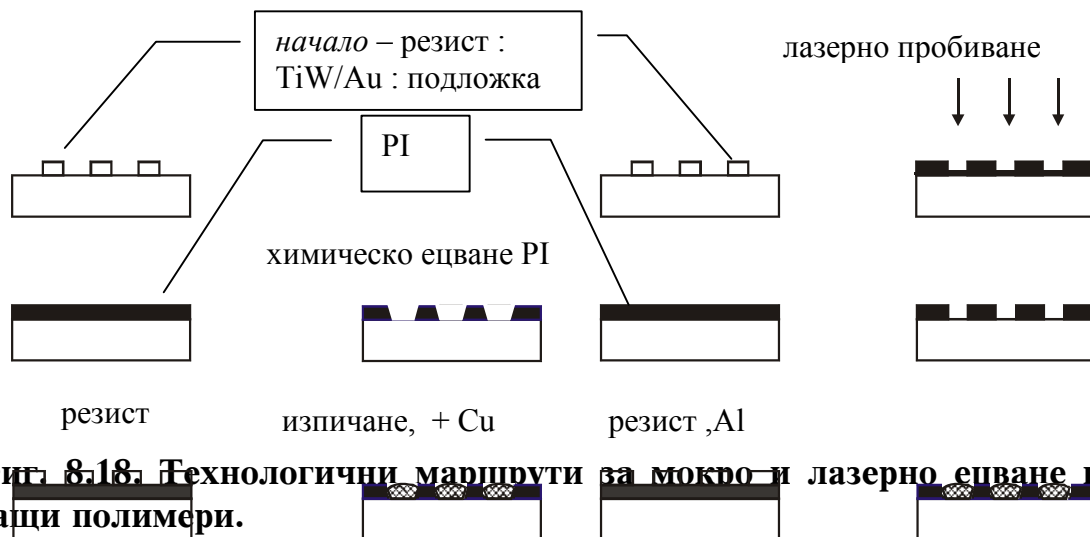


**Фиг. 8.17. Напречен разрез на схеми с метализирани отвори за връзка в многослойни системи: а) слепи и проходни; б) слепи и скрити; в) назъбени; г) стълбищни; д) спирални.**

Обикновено диаметърът на отворите се избира от порядъка на ширината на проводящите линии, които свързва, или около  $1/3$  от габаритите на контактните площадки. В съвременните МСМ (D) тези размери са от порядъка на  $15-250\mu m$ . Технологично те се изготвят чрез мокро ецване, реактивно йонно ецване (RIE) или пробиване с ултравиолетов ексимер лазер ( $248nm$ ) и мощност  $200mJ$ . Изолационните



диелектрични слоеве в повечето съвременни МСМ (D) са получени от нанасянето на високомолекулярни органични материали - полиимиди (PI) и бензоциклобутин (BCB), формиращи слоеве с дебелина от 5-20µm. Някои видове могат да бъдат фоточувствителни като фотолаковете и се обработват по същия начин.

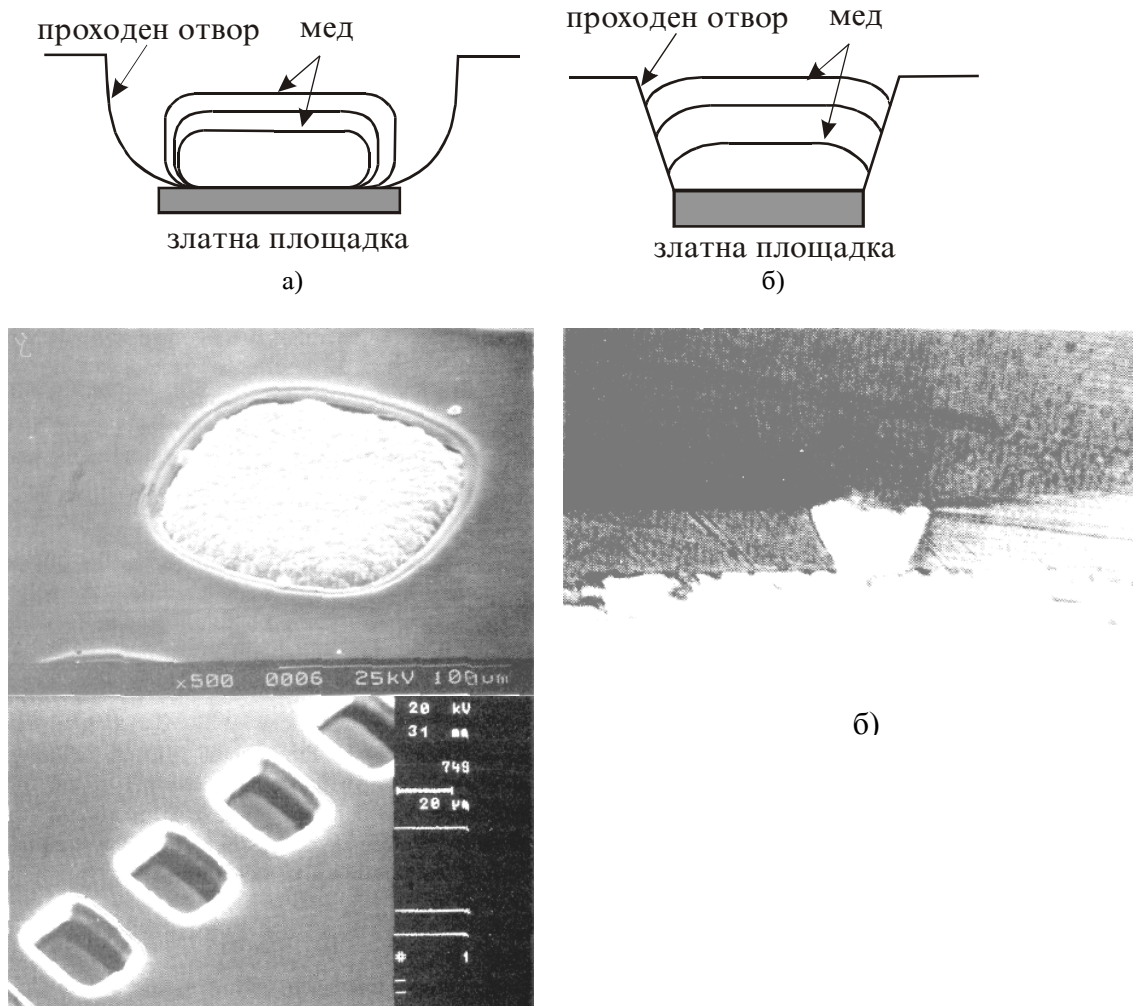


**Фиг. 8.18. Технологични маршрути за мокро и лазерно ецване на изолиращи полимери.**

Преди нанасяне, PI полимерите са обикновено в течно състояние и могат да се нанасят като фоторезист чрез центрофугиране или поливане. Преди изготвяне на отворите, PI се подлагат на сушене (80°C, 10min) и преимидизация (120-130°C, 20 min), а при последната си термична обработка (пълна имидизация) и кристализиране при 350-400°C за около 60 min.

BCB материалите полимеризират и остъкляват при по-ниски температури (200-250°C). При лазерното и RIE ецване на отвори, се използват и метални защитни маски от Al, Ni, които имат висок коефициент на отражение на ултравиолетовия лъч и малка степен на разлагане в реактивна плазма от фреон (CF<sub>4</sub>). Стените на отворите трябва да са с прав наклон от порядъка на 10-20° за да може да се осъществи надеждна вакуумна метализация без прекъсвания на ръбовете на отвора. В общи линии можем да опишем един типичен технологичен процес за метализация на отвори в МСМ (D) по следния начин:

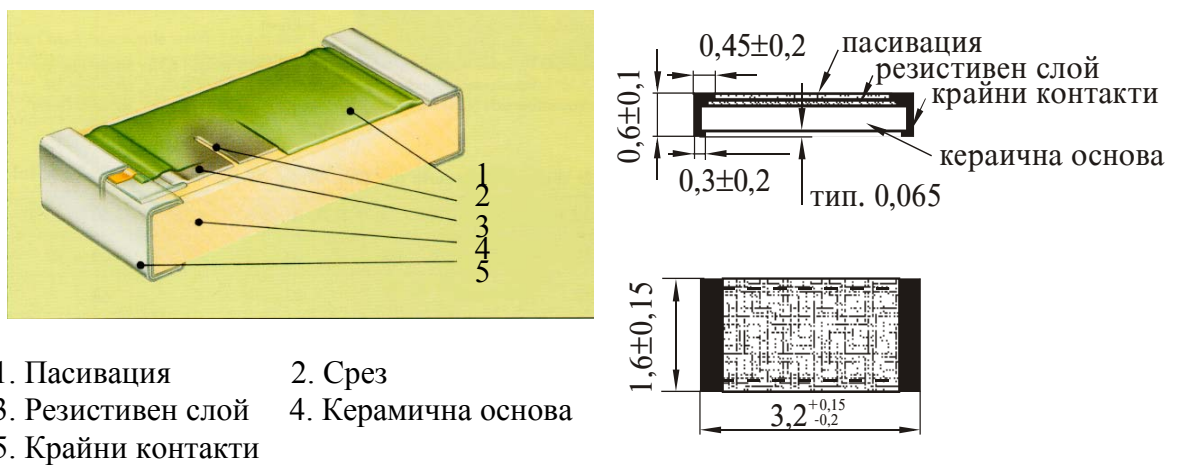
- Формиране на отвор с наклони в изолиращия диелектричен слой (отдолу трябва да има метална площадка).
- Тънка вакуумна метализация Ti/Pt/Au на отвора. Тя покрива долната метална площадка в отвора, стените му и част от диелектричния материал около горната апертура на отвора (ако се приложи защитна фоторезистивна маска и лифт-оф технология).
- Електрохимично или химично помедняване на тънкия вакуумен слой и частично запълване на отвора с метал.



Фиг. 8.19. а) SEM фотоснимка на химически ецван отвор в ВСВ, запълнен с химическо Au.; б) SEM фотоснимка на лазерно ецван отвор в ВСВ, запълнен с химическо Au.

8.4. Основни конструкции на обемни чип R,L,C елементи.

1). Резистивни чип елементи.

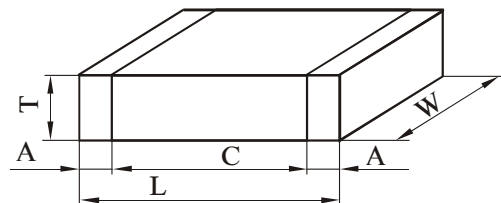
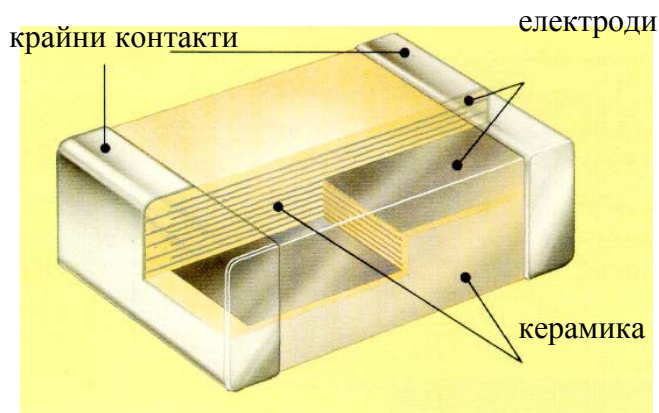


- 1. Пасивация
- 2. Срез
- 3. Резистивен слой
- 4. Керамична основа
- 5. Крайни контакти

Фиг. 8.20. Конструкция на резистивен чип елемент.

2). Капацитивни чип елементи.

А). Многослоен неполярен керамичен чип-кондензатор.



размер	L [mm]	W [mm]	T [mm]		A [mm]		C [mm]
			min	max	min	max	
0402							
0603							
0805	2.0±0.15	1.25±0.15	0.51	1.27	0.25	0.75	0.4
1206	3.2±0.15	1.6±0.15	0.51	1.6	0.25	0.75	-
1210	3.2±0.2	2.5±0.2	0.51	1.9	0.3	1	-
1808	4.5±0.2	2.0±0.2	0.51	1.9	0.3	1	-
1812	4.5±0.2	3.2±0.2	0.51	1.9	0.3	1	-
2220	5.7±0.2	5±0.2	0.51	1.9	0.3	1	-

**Фиг. 8.21. а) Конструкция на керамичен чип-кондензатор; б) Таблица с геометричните размери.**

Според относителната промяна на  $\Delta C/C$  от работното напрежение,  $\text{tg } \delta$  от температурата,  $\pm \text{TKC}$  от температурата и обхвата на своите номинали те са разделени на две основни групи:

I - NPO, N220, N750 - обхват на номиналните стойности от 0,47 - 1000nF.

II - X7R и Z5U (Y5V) - обхват на номиналните стойности 0,47 - 1000nF.

Б). Танталов полярен чип кондензатор.