

## Техничко решење

# Утицај конструкционих параметара кварцног резонатора на електричне карактеристике кристалне јединке у опсегу (1÷2)MHz

### Аутори:

Ленкица Грубишић, Ирини Рељин, Ана Гавровска, Драги Дујковић

Година: 2023

### Корисник:

Институт Михајло Пупин

### Начин коришћења:

Резултати експерименталних истраживања проширили су знања о утицају појединих конструкционих параметара (нарочито полупречника кривине конвексног дела плочице и пречника електроде) на електричне карактеристике (динамичка капацитивност  $C_1$ , нежељене резонанције и серијска отпорност) кристалних јединки АТ-реза у опсегу 1÷2 MHz за примену у кристалним филтрима. Ова сазнања омогућила су пројектовање кристалних јединки са најстрожим захтевима.

### Рецензенти:

## ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

<b>Назив</b>	Утицај конструкционих параметара кварцног резонатора на електричне карактеристике кристалне јединке у опсегу (1±2)MHz
<b>Аутори</b>	Ленкица Грубишић (Институт Михајло Пупин), Ирини Рељин (Електротехнички факултет у Београду), Ана Гавровска (Електротехнички факултет у Београду), Драги Дујковић (Електротехнички факултет у Београду).
<b>Категорија</b>	Ново техничко решење у фази реализације ( M85) Доказ: Протокол о тестирању
<b>Кључне речи</b>	Кристални филтри и осцилатори, кристалне јединке, електричне карактеристике

<b>За кога је решење рађено (правно лице или грана привреде):</b>
Техничко решење је рађено за потребе Института Михајло Пупин
<b>Година када је решење комплетирано:</b>
2023
<b>Година када је почело да се примењује и од кога:</b>
Примена техничког решења је почела у 2023. години Корисник: Институт Михајло Пупин-Пиезотехнологија
<b>Област и научна дисциплина на коју се техничко решење односи:</b>
Техничко-технолошке науке; информационо-комуникационе технологије ...
<b>Рецензенти техничког решења:</b>

### Технички елаборат:

- Проблем који се техничким решењем решава
- Стање решености тог проблема у свету
- Опис техничког решења са карактеристикама, укључујући пратеће илустрације и техничке цртеже
- Референце
- Рецензије техничког решења

# ТЕХНИЧКИ ЕЛАБОРАТ

## Проблем који се техничким решењем решава:

Вишеструка међузависност конструкционих параметара резонатора АТ-реза опсега (1÷2)MHz, нарочито полупречника кривине конвексног дела плочице и пречника електроде, и електричних карактеристика (динамичка капацитивност  $C_1$ , нежељене резонанције и серијска отпорност) кристалне јединке неизбежно доводи до контрадикторности, и стога до неопходности компромисног решења. Непостојање адекватних математичких модела, помоћу којих би се поуздано могле пројектовати и кристалне јединке са најстрожим захтевима, чини експериментални рад неопходним за успех у овој области.

Резултати експерименталних истраживања која су спроведена у Институту Михајло Пупин систематизовали су и проширили знања о утицају појединих конструкционих параметара на карактеристике овог типа кристалних јединки и омогућили поузданим и пројектовање кристалних јединки са најстрожим захтевима за примену у кристалним филтрима.

## Стање решености тог проблема у свету:

Пројектом филтра и осцилатора дефинишу се захтеви које мора да испуни кристална јединка која се у филтар или осцилатор уграђује и од које у највећој мери зависе њихове карактеристике. Кристална јединка мора да задовољи врло строге задате техничке карактеристике.

Високофреквентне кристалне јединке АТ-реза у опсегу (1÷2)MHz због строгих захтева поготово за примену у кристалним филтрима, представљају један од највећих проблема у области кварцних кристалних јединки. Непостојање адекватних математичких модела као и релативно оскудна литература посвећена овој теми чине ову проблематику веома сложеном с обзиром да мноштво међузависних параметара утичу често и контрадикторно на карактеристике кристалних јединки.

Резултати експерименталних истраживања која су спроведена у Институту Михајло Пупин проширили су знања о утицају појединих конструкционих параметара на карактеристике овог типа кристалних јединки и омогућили пројектовање поузданим.

## Опис техничког решења са карактеристикама, укључујући пратеће илустрације и техничке цртеже:

### Кратак опис

Најважније електричне карактеристике кристалне јединке АТ-реза за примену у кристалним филтрима у опсегу  $(1\div 2)$ MHz су динамичка капацитивност  $C1$ (fF), нежељене резонанције  $f_n$ (kHz) и серијска отпорност  $R1$ ( $\Omega$ ) на собној температури и у радном температурном опсегу. Конструкциони параметри резонатора који утичу на електричне карактеристике кристалне јединке дате фреквенције и реда овертона су:

- а) угао реза плочице у односу на кристалографске осе- $\Phi$
- б) пречник плочице- $\Phi$ (mm)
- в) полупречник кривине конвексног дела плочице- $R$ (mm)
- г) дебљина ивице плочице- $t_i$ (mm)
- д) пречник електроде (примарне и секундарне)- $d$ (mm)
- ђ) дебљина електроде (примарне и секундарне)- $t_e$ (mm)
- е) материјал електроде-Ag; Au
- ж) оријентација електроде у односу на кристалографске осе (азимутални угао)- $Z$ -оса;  $X$ -оса
- з) ширина и међусобни угао доводних трака електроде
- и) локација тачака монтаже

Пречник плочице је ограничен димензијама стандардног кућишта. Највећа плочица која се може уградити у стандардно хладно варено кућиште (НС-36 или НС-18), без интервенција на држачима има пречник од 14мм. Пошто је због што мањег пригушења осцилација на ивицама плочице, а тиме и мање отпорности, као и због што мањег спрезања са нежељеним начинима осциловања, пожељно да пречник буде што већи, разматран је максимални могући пречник  $\Phi=14$ мм. Такође, с обзиром да угао реза битно утиче само на облик температурне карактеристике фреквенције сматрали смо га константним у свим разматрањима.

На основу експерименталних резултата закључили смо да највећи утицај на динамичку капацитивност ( $C1$ ) овог типа кристалних јединки имају полупречник кривине конвексног дела плочице и пречник електроде, док се за задовољење строжијих захтева ( $\Delta C1 < 5\%$ ) мора водити рачуна и о азимуталном углу електрода и утицају секундарне електроде. Такође, показано је, да су два чиниоца која највише утичу на појаву нежељених резонанција ( $f_n$ ), особине електроде (пречник, дебљина, азимутални угао) и полупречник кривине конвексног дела плочице, као и да је често неопходно правити компромис између удаљености и потиснутости нежељених резонанција. Компромисна решења су неопходна и при избору полупречника кривине због његовог великог утицаја на отпорност кристалне јединке ( $R1$ ). На избор у великој мери утиће дебљина ивице плочице која се добија са појединим полупречницима кривине као и дебљина плочице у тачкама монтаже. Дебљина ивице мање од 0,15мм су непрактичне због крзања, док оптимална дебљина плочице у тачкама монтаже зависи од типа држача који такође има битан утицај на отпорност због пригушивања осцилација и увођења додатних механичких напрезања.

### Техничке карактеристике

Кристални филтари у опсегу  $(1\div 2)$ MHz реализују се са сферно обрађеним (SS; PS; PsPs) кварцним плочицама АТ-реза основне учестаности ( $n=1$ ) пречника  $\Phi=14$ мм. Карактеристике кристалних јединки за ову примену су: Фреквенција  $F_0=(1\div 2)$ MHz. Подешеност фреквенције на 25°C је  $\Delta F/F_0=\pm 2,5$ ppm. Радни температурни опсег (-

55÷+90)°C. Одступање фреквенције у радном температурном опсегу је  $\Delta F/F_0 = \pm 25 \text{ ppm}$ . Старење кристалне јединке је  $\pm 1 \cdot 10^{-6} / \text{год}$ . Толеранција динамичке капацитивности  $\pm 2\%$ . Серијска отпорност  $R_{1\text{max}} = 110 \Omega$ . Q-фактор  $\geq 100000$ . Потиснутост нежењених резонанција  $\geq 30 \text{ dB}$ . Материјал електроде сребро. Кућиште хладно варено НС-36 или НС-18.

### **Техничке могућности**

Полазећи од карактеристика филтара у опсегу 1÷2 MHz и њиховог утицаја на неопходне карактеристике кристалних јединки у овом раду су приказани резултати експерименталног истраживања који је био неопходан за адекватно разумевање појава које се јављају код контурованих кристалних јединки (које се готово увек користе у овом фреквентном подручју) а који представљају основ за пројектовање кристалних јединки овог типа.

Овим радом су проширена и систематизована знања о утицају конструкционих параметара кристалних јединки у опсегу 1÷2 MHz на њихове електричне карактеристике.

Ова знања омогућавају развој нових типова кристалних јединки и филтара из овог фреквентног опсега у краћем времену и са већом извесношћу успеха него до сада.

### **Утицај конструкционих параметара кварцног резонатора на електричне карактеристике кристалне јединке у опсегу (1÷2)MHz**

Кристални филтари у опсегу (1÷2)MHz због својих врло строгих захтева реализују се са сферно обрађеним (SS; PS; PsPs) кварцним плочицама АТ-реза основне учестаности ( $n=1$ ) пречника  $\Phi=14 \text{ mm}$ . Карактеристике кристалних јединки за ову примену су: Фреквенција  $F_0 = (1 \div 2) \text{ MHz}$ . Подешеност фреквенције на 25°C је  $\Delta F/F_0 = \pm 2,5 \text{ ppm}$ . Радни температурни опсег (-55÷+90)°C. Одступање фреквенције у радном температурном опсегу је  $\Delta F/F_0 = \pm 25 \text{ ppm}$ . Старење кристалне јединке је  $\pm 1 \cdot 10^{-6} / \text{год}$ . Толеранција динамичке капацитивности  $\pm 2\%$ . Серијска отпорност  $R_{1\text{max}} = 110 \Omega$ . Q-фактор  $\geq 100000$ . Потиснутост нежењених резонанција  $\geq 30 \text{ dB}$ . Материјал електроде сребро. Кућиште хладно варено НС-36 или НС-18.

Најважније електричне карактеристике кристалне јединке АТ-реза за примену у кристалним филтрима у опсегу (1÷2)MHz су динамичка капацитивност  $C_1 (\text{fF})$ , нежељене резонанције  $f_n (\text{kHz})$  и серијска отпорност  $R_1 (\Omega)$  на собној температури и у радном температурном опсегу. Конструкциони параметри резонатора који утичу на електричне карактеристике кристалне јединке дате фреквенције и реда овертона су: 1) угао реза плочице у односу на кристалографске осе 2) пречник плочице, 3) облик плочице, 4) материјал електроде, 5) пречник електроде, 6) дебљина електроде, 7) ширина и међусобни угао доводних трака електроде, 8) оријентација електроде у односу на кристалографске осе (азимутални угао), 9) положај секундарне електроде и 10) локација тачака монтаже. Пречник плочице је ограничен димензијама стандардног кућишта. Највећа плочица која се може уградити у стандардно хладно варено кућиште

(НС-36 или НС-18), без интервенција на држачима има пречник од 14мм. Пошто је због што мањег пригушења осцилација на ивицама плочице, а тиме и мање отпорности, као и због што мањег спрезања са нежељеним начинима осциловања, пожељно да пречник буде што већи, разматран је максимални могући пречник  $\Phi=14\text{мм}$ . Такође, с обзиром да угао реза битно утиче само на облик температурне карактеристике фреквенције сматрали смо га константним у свим разматрањима.

### Утицај конструкционих параметара резонатора на динамичку капацитивност кристалне јединке

Параметри који највише утичу на вредност динамичке капацитивности  $C_1$  кристалних јединки са контурованим резонаторима су пречник електроде, полупречник кривине конвексног дела плочице, ред овертона и азимутални угао електрода док је утицај осталих параметара занемарљиво мали.

Полазећи од познатог израза за  $C_1$  (fF) из литературе:

$$C_1 = F \cdot k \cdot d^2 / n^3 \quad (1)$$

Где је  $d$  (mm)-пречник електроде,  $F$  (MHz)-фреквенција,  $n(1;3;5)$ -ред овертона а  $k$ -емпиријски коефицијент.

Код планпаралелних плочица на основу експериментално добијених вредности динамичке капацитивности ( $C_1$ ) за разне пречнике електрода ( $d$ ) из израза (1) добијена је вредност коефицијента  $k \sim 0,1$ .

За сферне плочице погодним избором радијуса сфере ( $R$ ) локализује се активна вибрациона зона у центар плочице чији се ефективни пречник израчунава по формули:

$$d_{\text{ef}} = 3,14 \cdot (R \cdot t^3)^{0,25} \quad (2)$$

за гранични случај ( $d_{\text{ef}} = d$ ) важи:

$$d^2 = 3,14^2 \cdot (R \cdot t^3)^{0,5} \quad (3)$$

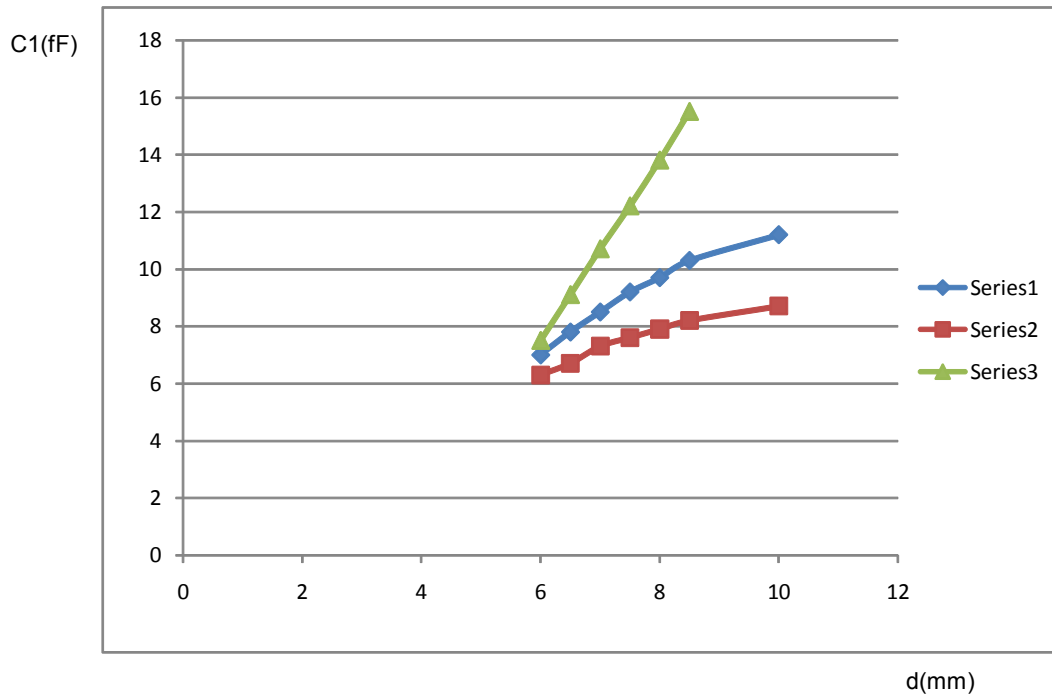
тако да следи да је:

$$C_1 = F \cdot k \cdot 3,14^2 \cdot (R \cdot t^3)^{0,5} / n^3 \quad \text{тј., заменом } k \cdot 3,1416^2 = 10^3 / k_A \quad (4)$$

$$C_1 = F \cdot (R \cdot t^3)^{0,5} / (n^3 \cdot k_A) \cdot 10^3 \quad (5)$$

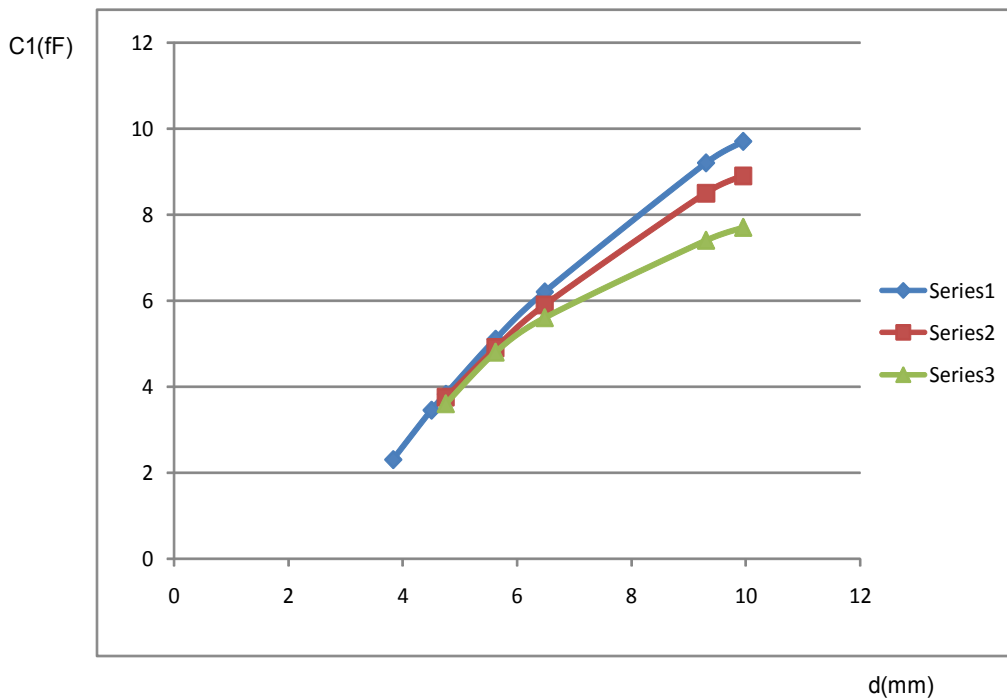
Заменом експериментално добијених вредности  $C_1$ ,  $R$  и  $t$  у израз (5) за  $d_{\text{ef}} = d$  за жељену фреквенцију и облик плочице, за разне случајеве биконвексних (SS) и планконвексних (PS) плочица добија се вредност коефицијента  $k_A \sim 1300$ . Међутим немамо добро слагање израчунатих (израз (5)) са експериментално добијеним вредностима за  $C_1$  за различите вредности електрода. Коефицијент  $k_A$  се прилично мења са величином електроде ( $k_A = 800 \div 1400$ ). Из тог разлога снимљене су криве зависности  $C_1$  (fF) од пречника електроде  $d$  (mm) за различите вредности  $R$  (mm) јединки 1800kHz и 1400kHz.

f= 1800kHz Φ= 14mm			
Oblik	PS/60	PS/30	PsPs/30
d(mm)	C1(fF)	C1(fF)	C1(fF)
6	7	6,3	7,5
6,5	7,8	6,7	9,1
7	8,5	7,3	10,7
7,5	9,2	7,6	12,2
8	9,7	7,9	13,8
8,5	10,3	8,2	15,5
10	11,2	8,7	



Сл.1

f= 1400 Φ= 14mm			
Oblik	SS/70	SS/60	SS/40
d(mm)	C1(fF)	C1(fF)	C1(fF)
3,83	2,3		
4,5	3,45		
4,75	3,82	3,75	3,6
5,62	5,1	4,9	4,8
6,48	6,2	5,9	5,6
9,3	9,2	8,5	7,4
9,95	9,7	8,9	7,7



Сл.2

На сл.1 и сл.2 се види да криве ни за максимални пречник електроде од 10мм нису ушле у равни део што значи да електроде још увек не обухватају целу активну зону плочице која је првенствено одређена полупречником кривине. Зато су ивице плочице веома активне што отежава монжажу. За кристалне јединке  $f=1800\text{kHz}$  облика PS/30 најактивнији део плочице је у централној зони пречника  $def=7,3\text{mm}$ , за PS/60  $def=8,6\text{mm}$  а за PsPs/30 цела плочица је активна. Док за кристалне јединке  $f=1400\text{kHz}$  облика SS/70 најактивнији део плочице је у централној зони пречника  $def=9,18\text{mm}$ , за SS/60  $def=8,84\text{mm}$  а за SS/40  $def=8,04\text{mm}$ .

Сферним обликом кварцне плочице смањује се вредност динамичке капацитивности C1 за исту вредност пречника електроде.

На основу израза из литературе (5) за C1 и низа експеримената дошло се до јединствене формуле за израчунавање C1:

$$C1 = F \cdot (R \cdot t^3)^{0,5} / (n^3 \cdot k_A) \cdot 10^3 \cdot (1 - e^{-((k_B \cdot d^2) / (R \cdot t^3)^{0,5})}) \quad (6)$$



где је F(MHz)-фреквенција, R(mm)-полупречник кривине конвексног дела плочице, t(mm)-дебљина плочице у центру, d(mm)-пречник електроде, n(1;3;5)-ред овертона а ка и кв емпиријски коефицијенти (одређени као средња вредност у односу на мерења различитих типова кристалних јединки).

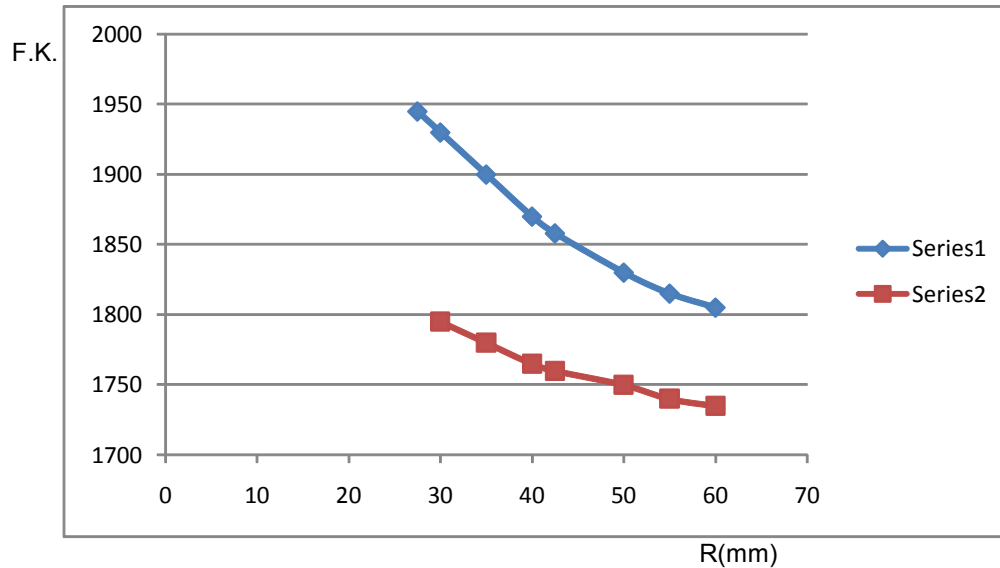
За израчунавање дебљине плочице у центру  $t(\text{mm})=F.K./f_{\text{osn}}(\text{kHz})$  за жељену фреквенцију, потребно је знати фреквентну константу плочице (F.K.) која зависи од полупречника кривине плочице.

У табели приказане су измерене дебљине плочица у фреквентном опсегу од 1÷2 MHz за различите облике плочица и добијене одговарајуће израчунате вредности фреквенрних константи ( $F.K.=t(\text{mm}) * f_{\text{osn}}(\text{kHz})$ ).

f(kHz)	oblik	F.K.	t(mm)
1000	SS/27,5	1945	1,947
1024	SS/30	1930	1,885
1120	SS/35	1900	1,693
1230	SS/40	1870	1,520
1378	SS/42,5	1850	1,343
1477	SS/50	1830	1,238
1578	SS/55	1815	1,150
1600	SS/60	1805	1,127
1800	PS/30	1795	0,996
2050	PS/40	1765	0,962

Табела 1.

Oblik=SS		Oblik=PS	
R(mm)	F.K.ss	F.K.ps	
27,5	1945		
30	1930	1795	
35	1900	1780	
40	1870	1765	
42,5	1858	1760	
50	1830	1750	
55	1815	1740	
60	1805	1735	



Сл.3

Са дијаграма се види да је фреквентна константра за PS/30 иста као и фреквентна константа за SS/60. У прорачунима динамичке капацитивности  $C_1$  сводили смо биконвексни облик на одговарајући планконвексни тј.на пр. SS/60 на PS/30 па је за дебљину плочице у центру узета дебљина фиктивне планконвексне плочице.

Установљено је да коефицијент  $k_A$  зависи од врсте реза и да за АТ-рез он износи  $k_A=1103$ . Такође установљено је да вредност коефицијента  $k_B$  зависи од облика плочице (SS; PS) и реда овертона ( $n$ ). С обзиром да у прорачуну динамичке капацитивности ( $C_1$ ) биконвексни облик сводимо на планконвексни ( $R_{ps}=R_{ss}/2$ ) коефицијент  $k_B$  има вредност:

1) за плочице АТ-реза основне учестаности ( $n=1$ ) за облик:  
SS и PS;  $k_B=0,196$

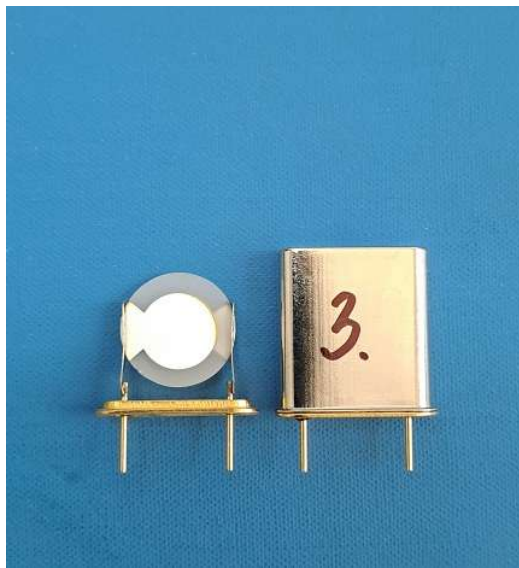
2) за плочице АТ-реза трећег овертона ( $n=3$ ) за облик:  
PS;  $k_B=0,408$

што важи и за  $\Phi=14$  и  $\Phi=8$  плочице.

Утицај азимуталног угла електроде односно оријентација електрода дуж X и Z кристалографске осе (за случај доводних трака електрода под међусобним углом од  $180^\circ$  (сл.4), што је наметнуто стандардним типовима држача за ово фреквентно подручје) имају врло мали утицај на вредност динамичке капацитивности. Добијено је да су вредности C1 за 1,5% веће при оријентацији електрода дуж Z-осе.

Ширина доводних трака електрода не утиче на C1 али се паралелна капацитивност ( $C_0$ ) увећа за 5% са широм доводном траком (сл.4). С друге стране мала секундарна електрода веће дебљине (10% од основне електроде и више) смањује вредност C1 и до 5% а  $C_0$  остаје исто. Ово се објашњава додатном локализацијом енергије.

На основу експерименталних резултата закључили смо да највећи утицај на динамичку капацитивност (C1) овог типа кристалних јединки, имају полупречник кривине конвексног дела плочице и пречник електроде, док се за задовољење строжијих захтева ( $\Delta C1 < 5\%$ ) мора водити рачуна и о азимуталном углу електрода и утицају секундарне електроде.



Сл.4

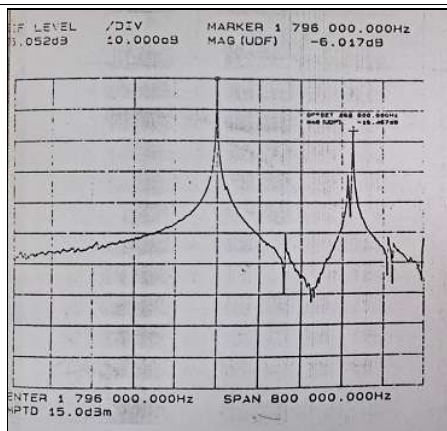
### **Утицај конструкционих параметара резонатора на нежељене резонанције кристалне јединке**

У овом раду експериментално је проверен утицај најважнијих конструкционих параметара (пречник електроде, дебљина електриде, полупречник кривине конвексног дела плочице, оријентација електрода у односу на кристалографске осе-азимутални угао) на нежељене резонанције кристалне јединке.

#### 1) Утицај пречника електроде

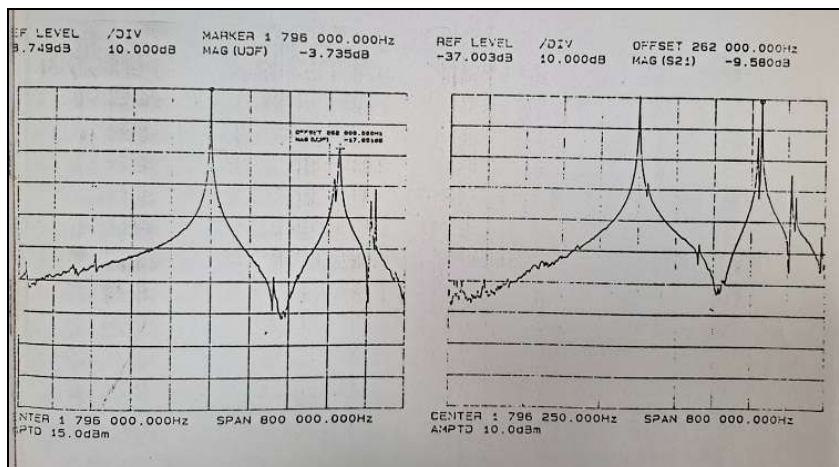
На сл.5 приказан је утицај величине електроде ( $d=5,89\text{mm}$ ;  $8,45\text{mm}$  и  $9,96\text{mm}$ ) исте дебљине (фактора напаравања  $k=0,8$ ) на положај и величину споредних резонанција код планконвексних кристалних јединки  $\Phi=14\text{mm}$ , фреквенције  $f=1800\text{kHz}$ , полупречника кривине  $R=30\text{mm}$ . Са слике се види да је положај споредних резонанција у свим случајевима исти, али да је јачини прве споредне на удаљености  $130\text{kHz}$  од централне мања са већом електродом док је друга споредна на удаљености  $262\text{kHz}$  од

централне већа са електродом  $d=9,96\text{mm}$ . Појава овако изражене споредне последица је побуђивања на осциловање дела плочице који је изван активне зоне у којој је локализована енергија план ковексним обликом резонатора (PS/30).



$d=5,89\text{mm}$

a)



$d=8,45\text{mm}$

б)

$d=9,96\text{mm}$

в)

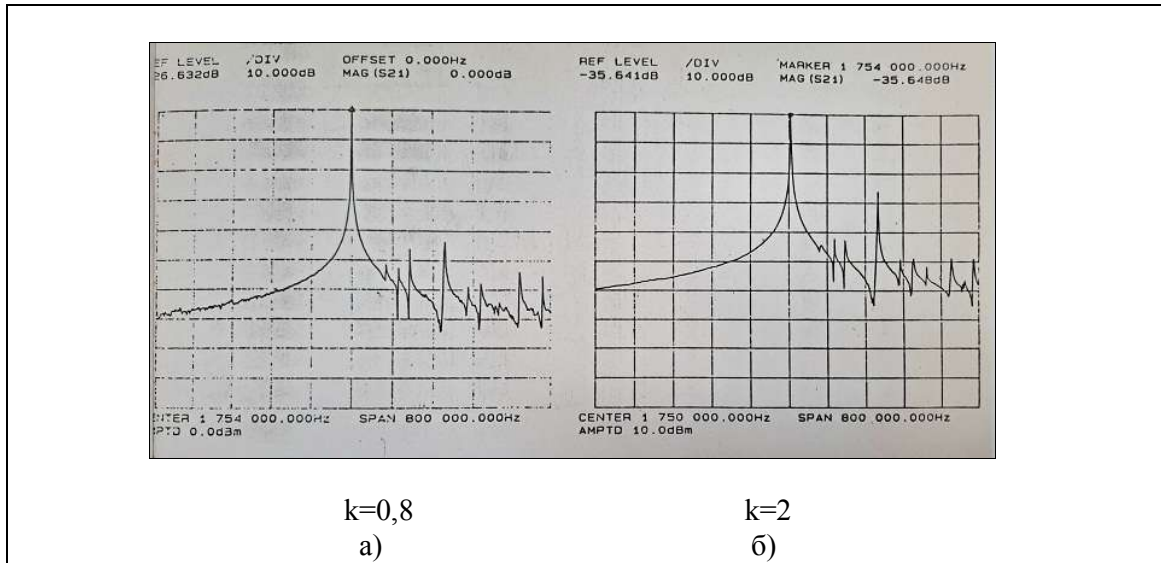
$F=1,8\text{MHz}$ ,  $\Phi=14\text{mm}$ , PS/30,  $k=0,8$

Сл.5

Мања електроде значи већа отпорност =>МАЊА ДРУГА СПОРЕДНА  
=>ВЕЋА ПРВА СПОРЕДНА

2) Утицај дебљине електроде

На сл.6 приказан је утицај дебљине електроде (фактора напаравања  $k=0,8$  и  $k=2$ ) на положај и величину споредних резонанција код планконвексних кристалних јединки  $\Phi=14\text{mm}$ , фреквенције  $f=1800\text{kHz}$ , полупречника кривине  $R=60\text{mm}$  електроде  $d=5,62\text{mm}$ . Са слике се види да је положај нежељене резонанције која се јавља на  $187\text{kHz}$  од главне у оба случаја исти али је њена потиснутост мања за  $18\text{dB}$  са дебљим електродама. Прва јаћа нежељена резонанција која се налази на  $115\text{kHz}$  од главне померила се од главне за  $4\text{kHz}$  и њена потиснутост је већа за  $8\text{dB}$  са дебљим електродама.



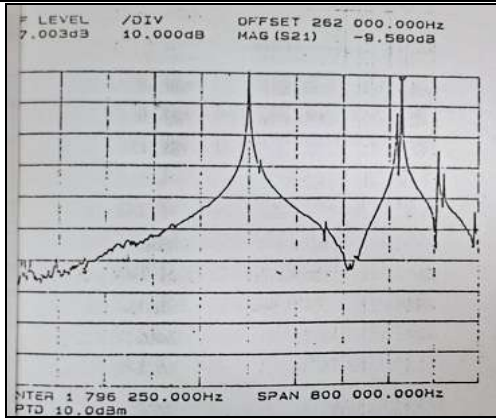
$F=1,75\text{MHz}$ ,  $\Phi=14\text{mm}$ ,  $PS/60$ ,  $d=5,62\text{mm}$

Сл.6

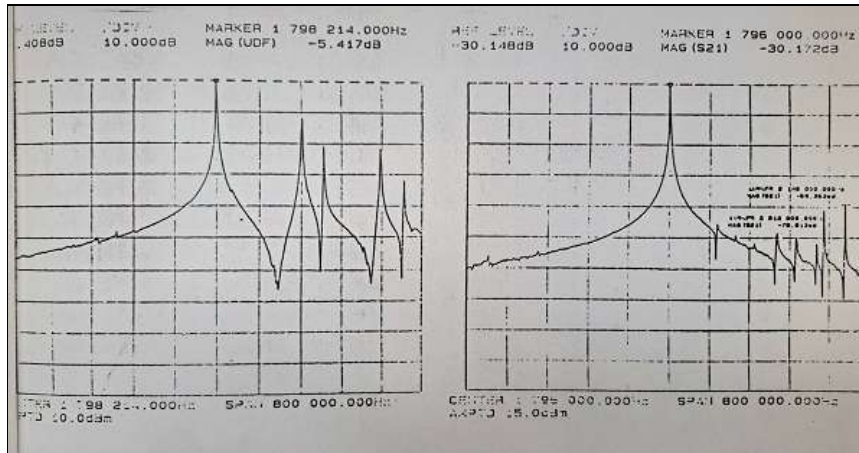
Мања дебљина електроде значи већа отпорност =>МАЊА ДРУГА СПОРЕДНА  
=>ВЕЋА ПРВА СПОРЕДНА  
И БЛИЖА ГЛАВНОЈ

### 3) Утицај полупречника кривине конвексног дела плочице

Утицај полупречника кривине конвексног дела плочице приказан је на сл.7. Нежељене резонанције су код резонатора са већим полупречником кривине ближе главној резонанцији али су и потиснутије и приближавају се случају планпаралелне плочице.



PS/30  
a)



PS/100  
б)

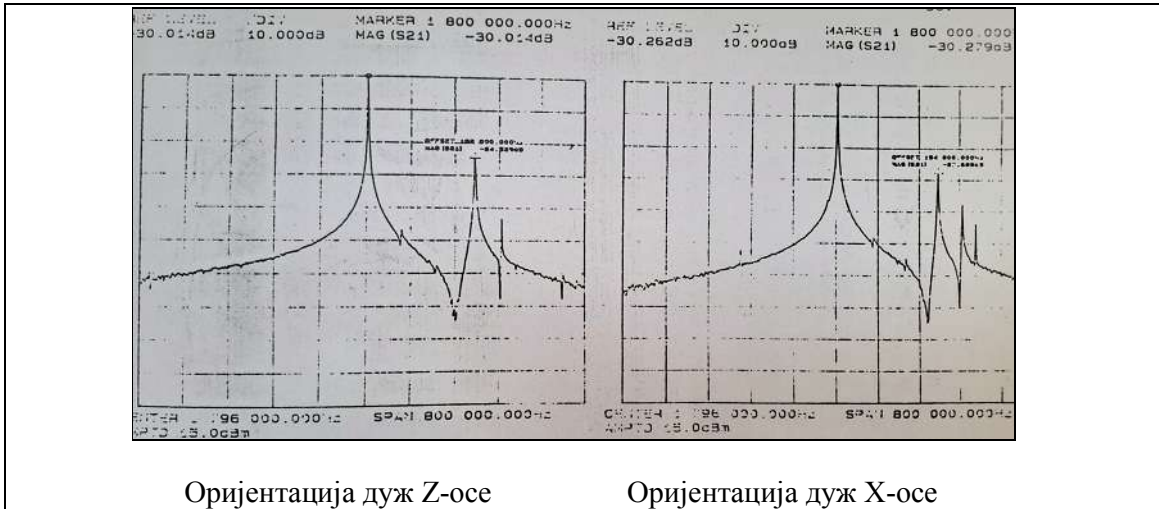
PsPs/30  
в)

$F=1,8\text{MHz}$ ,  $\Phi 14$ ,  $k=0,8$ ,  $d=9,49\text{mm}$

Сл.7

- 4) Утицај оријентације електрода у односу на кристалографске осе (азимутални угао)

Експериментално је утврђено да оријентација електрода у односу на кристалографске осе (азимутални угао) практично не утиче на нежељене резонанције што је приказано на сл.8.



$F=1,8\text{MHz}$ ,  $\Phi 14$ , PS/60,  $d=6,18\text{mm}$

Сл.8

Појава треће споредне код резонатора чија је оријентација дуж X-осе, последица је несиметрија услед: ексцентричних електрода, различите дебљине филма са две стране резонатора, ексцентричне секундарне електроде, итд.

Показано је, да су два чиниоца која највише утичу на појаву нежељених резонанција ( $f_n$ ), особине електроде (пречник, дебљина) и полупречник кривине конвексног дела плочице, као и да је често неопходно правити компромис између удаљености и потиснутости нежељених резонанција. Компромисна решења су неопходна и при избору полупречника кривине због његовог великог утицаја на отпорност кристалне јединке ( $R_1$ ).

### Утицај конструкционих параметара резонатора на отпорност кристалне јединке

Идеално би било да се све осцилације кварцне плочице одвијају у простору између електрода и да се побуђују само основне дебљинско- смичуће осцилације. Тада не би долазило до губитака енергије услед механичког пригушења осцилација у тачкама на периферији кварцне плочице (где се врши монтажа плочице у држач), као ни до губитака услед побуђивања осталих начина осциловања и њиховог евентуалног спрезања са основним дебљинско- смичућим. У стварности до ових губитака увек долази, и то све више што је однос пречника и дебљине кварцне плочице мањи јер тада остали начини осциловања преовлађују над дебљинско-смичућим.



Локализовањем енергије осциловања у централном делу плочице путем обликовања плочице **контуровањем**, погодним избором радијуса сфере ( $R$ ) за одређени однос пречника и дебљине плочице ( $\Phi/t$ ) плочице, ови губици се свде на најмању могућу меру. Компромисна решења су неопходна и при избору полупречника кривине због његовог великог утицаја на отпорност кристалне јединке ( $R1$ ). На избор у великој мери утиће дебљина ивице плочице ( $t_i$ ) која се добија са појединим полупречницима кривине као и дебљина плочице у тачкама монтаже држаћа ( $t_d$ ). Дебљина ивице мање од 0,15мм су непрактичне због крзања, док оптимална дебљина плочице у тачкама монтаже зависи од типа држача који такође има битан утицај на отпорност због пригушивања осцилација и увођења додатних механичких напрезања.

Обликовањем (SS; PS) кварцних плочица фреквенције 1÷2 MHz елиминишу се три ефекта који доприносе повећању еквивалентне серијске отпорности: локализује се активна вибрациона зона у центар плочице; стањују се ивице што смањује пригушење вибрација; померају се фреквенције нежељених несмичућих резонанција на већу удаљеност од жељене основне дебљинско-смичуће резонантне фреквенције, чиме се елиминише могућност спрезања.

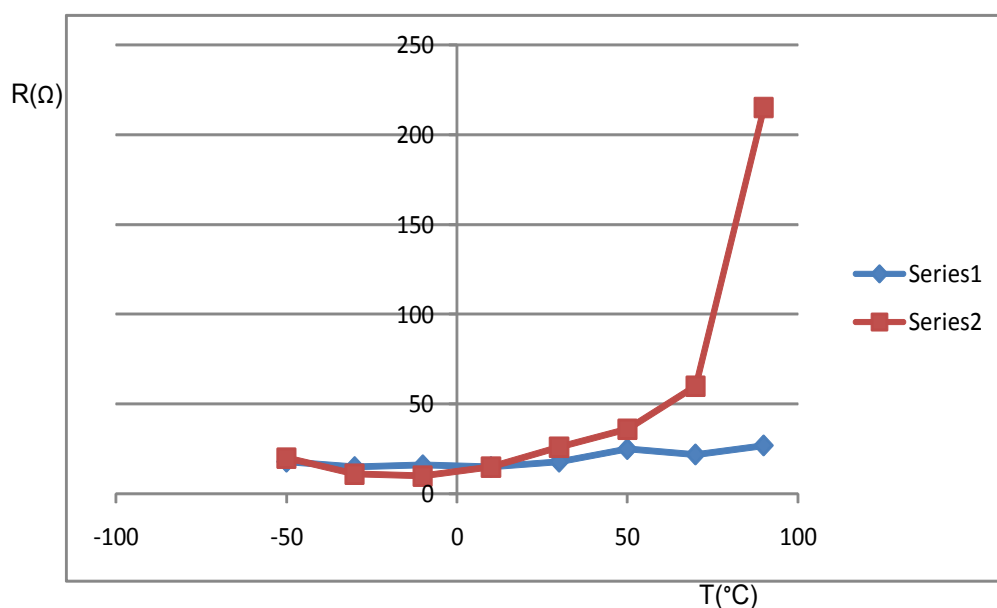
Проблеми везани за пројектовање и реализацију ових јединки постају израженији идући ка доњој граници овог фреквентног опсега због изразито малог односа пречника ( $\Phi=14\text{mm}$ ) и дебљине кварцне плочице ( $t\sim 1,9\text{mm}$ ) који захтева одабир биконвексног облика плочице малог радијуса сфера ради изоловања жељеног дебљинско-смичућег начина осциловања од нежељених савијајућих вибрација и спречавања њиховог спрезања.

При овако малим односима пречник-дебљина ( $\Phi/t=7,2\div 15,7$ ) кварцних плочица фреквенције 1÷2 MHz, локализовање енергије у центру плочице није довољно изражено тако да су ивице плочице у некој мери активне. Зато неадекватна монтажа може да изазове пригушење осцилација а тиме и пораст отпорности и појаву нерегуларности температурних карактеристика. С друге стране, монтажа мора да обезбеди довољно чврсту конструкцију плочица-држач. Стога је неопходан компромис између ових захтева. Основни принцип је да држач што мање задире ка средишту плочице, а да конструкција још увек има неопходну чврстину.

Зависност отпорности од радне температуре за резонаторе фреквенције  $F=1,8\text{MHz}$ , пречника  $\Phi=14\text{mm}$ , електроде  $d=9,49\text{mm}$ , облика PsSs/60 и PS/30 са којима се остварује оптимална дебљина плочице на ивици  $t_i\sim 0,2\text{mm}$  као и оптимални и неоптимални однос  $def/\text{del}$  дата је на слици сл.9.



f= 1800 Φ= 14mm		
Oblik	PsSs/60	PS/30
T(°C)	R(Ω)	R(Ω)
-50	18	20
-30	15	11
-10	16	10
10	15	15
30	18	26
50	25	36
70	22	60
90	27	215



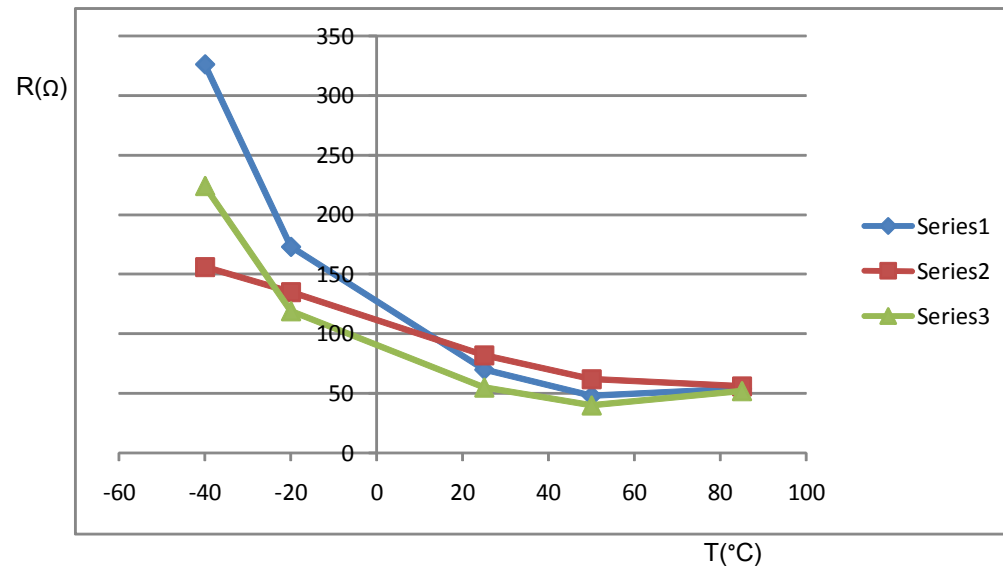
Сл.9

Са електродом  $d=9,49\text{mm}$  код резонатора са полупречником кривине  $R=30\text{mm}$  имамо појаву раста отпорности на вишим температурама као последицу побуђивања на осциловање дела плочице који је изван активне зоне пречника  $def=7,3\text{mm}$  у којој је локализована енергија планковексним обликом резонатора (PS/30) код кога је  $def/del=0,76$ . Значајан скок отпорности на температурама око  $90^\circ\text{C}$  је последица јаког спрезања дебљинско смичућег са нежељеним начинима осциловања. Са слике се види да се ово спрезање отклања са плочицом полупречника кривине  $R=60\text{mm}$  чија је активна зона пречника  $def=8,6\text{mm}$  и  $def/del \geq 0,9$ . Овде је присутан само благи пораст отпорности са температуром. Закључујемо да је оптималан облик онај са којим се остварује  $def/del \geq 0,9$ .

Зависност отпорности од радне температуре за резонаторе фреквенције  $F=1,8\text{MHz}$ , пречника  $\Phi=14\text{mm}$ , електроде  $d=7,49\text{mm}$ , облика SS/55 (чија је активна зона пречника

def=7,17mm) са којима се остварује оптимални односом def/del=0,96 али неоптимална дебљина плочице на ивици ti=0,139mm дата је на слици сл.10.

f= 1800			
Φ= 14mm			
ti= 0,139mm			
Oblik	SS/55		
T(°C)	R(Ω)кЈ1	R(Ω)кЈ2	R(Ω)кЈ3
-40	326	156	224
-20	173	135	119
25	70	82	55
50	48	62	40
85	54	56	52



Сл.10

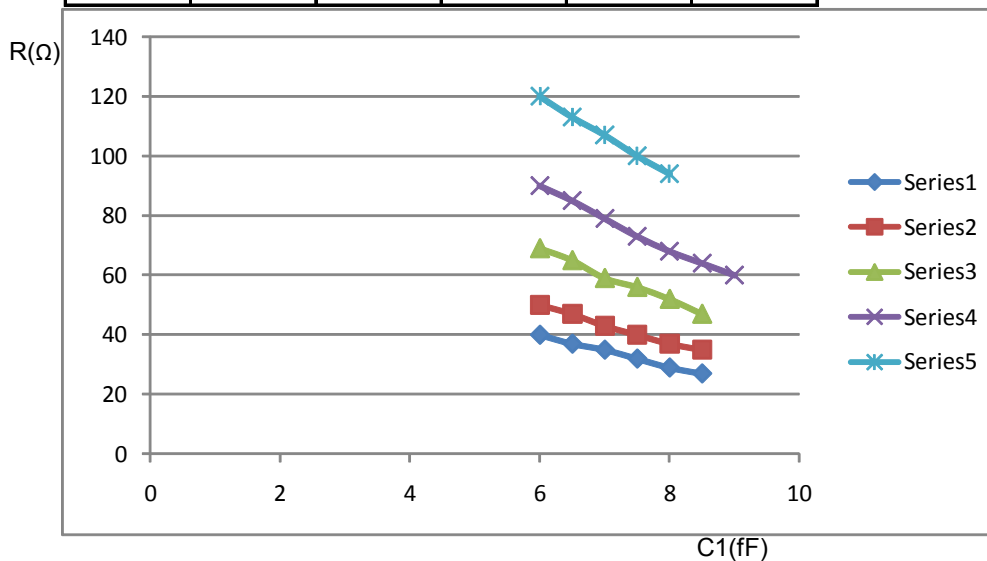
На слици се види пораст отпорности на ниским температурама што је последица ивичних ефеката.

Формула за израчунавање отпорности

На основу низа експериментално добијених вредности C1 и R1 кристалних јединки из фреквентног опсега 1÷2MHz у RW кућишту пречника плочице Φ14 различитих дебљина кварцне плочице, добијена је формула са којом се са великом тачношћу израчунава отпорност. Дијаграми зависности R1 од C1 за различите дељине плочица тј. различитих фреквенција приказани су на сл.11.

RW-kućište  
 $\Phi=14$

oblik:	PS	PS	SS	SS	SS
F:	F=2MHz	F=1,8MHz	F=1,6MHz	F=1,4MHz	F=1,2MHz
t(mm):	0,88	0,99	1,14	1,27	1,5
C1(fF)	R1( $\Omega$ )	R1( $\Omega$ )	R1( $\Omega$ )	R1( $\Omega$ )	R1( $\Omega$ )
6	40	50	69	90	120
6,5	37	47	65	85	113
7	35	43	59	79	107
7,5	32	40	56	73	100
8	29	37	52	68	94
8,5	27	35	47	64	
9				60	



Сл.11

С обзиром да је отпорност обрнуто пропорционална са динамичком капацитивношћу ( $C_1$ ) а управо пропорционална са квадратом дебљине плочице ( $t$ ) добијамо да је:

$$R1(\Omega) = C * t^2 / C1 * 10^3 \quad (7)$$

Где коефицијент  $C$  зависи од врсте затварања кристалне јединке (RW;CW), пречника и облика плочице. Експериментално добијена вредност коефицијента  $C$  за плочице пречника  $\Phi=14$ мм у RW кућишту са одговарајућом монтажом, оптималног полупречника кривине  $R$  који обезбеђује  $t_i \geq 0,15$ мм (због крзања) и  $t_d \leq 0,3$ мм (тј. мање од ширине прореза држача), за PS и SS-облик са фасетама или без њих, је  $C=0,35$ . За контуроване кристалне јединке овог опсега које су затворене у вакууму у CW кућишту овај коефицијент је  $2 \div 2,5$  пута мањи тј. отпорност је мања за два до два ипо пута.

Све појаве које су разматране у овом раду указују на вишеструку међузависност конструкционих параметара резонатора АТ-реза опсега  $(1 \div 2)$ MHz, нарочито полупречника кривине конвексног дела плочице и пречника електроде, и електричних карактеристика (динамичка капацитивност  $C_1$ , нежељене резонанције и серијска отпорност) кристалне јединке. Овакво мноштво утицаја неизбежно доводи до контрадикторности, и стога до неопходности компромисног решења.

## Примена

Кристални филтари у опсегу  $(1\pm 2)$  MHz због својих врло строгих захтева реализују се са сферно обрађеним (SS; PS; PsPs) кварцним плочицама АТ-реза основне учестаности ( $n=1$ ) пречника  $\Phi=14$  mm. Карактеристике кристалних јединки за ову примену су: Фреквенција  $F_0=(1\pm 2)$  MHz. Подешеност фреквенције на  $25^\circ\text{C}$  је  $\Delta F/F_0=\pm 2,5$  ppm. Радни температурни опсег  $(-55\div +90)^\circ\text{C}$ . Одступање фреквенције у радном температурном опсегу је  $\Delta F/F_0=\pm 25$  ppm. Старење кристалне јединке је  $\pm 1\cdot 10^{-6}$ /год. Толеранција динамичке капацитивности  $\pm 2\%$ . Серијска отпорност  $R_{1\text{max}}=110\Omega$ . Q-фактор  $\geq 100000$ . Потиснутост нежењених резонанција  $\geq 30\text{dB}$ . Материјал електроде сребро. Кућиште хладно варено НС-36 или НС-18.

## Референце:

- [1] L.Maissel, R.Glaug „Handbook of Thin Film Technology“ Mc Graw-Hill, New York 1970.
- [2] Roger E. Bennett „,Manufacturing Guide for „AT“ Type Units “ Niles, Illinois 1960.
- [3] H.K.Pulker „Coatings of Glass“ Elsevier, Tokyo 1984.

## ПРОТОКОЛ О ТЕСТИРАЊУ КРИСТАЛНИХ ЈЕДИНКИ

**РЕЗ-АТ**

**ФРЕКВЕНЦИЈА-  $F_0=1\div 2\text{MHz}$**

**РЕЗОНАНЦИЈА-  $n=1$**

- 1) Контрола ивица кварцне плочице-визуелна: без крзотина
- 2) Контрола пречника кварцне плочице- микрометар:  $\Phi=(14,00 \pm 0,05)\text{mm}$
- 3) Контрола дебљине кварцне плочице-микрометар:  $t=(0,88\div 1,94)\text{mm}\pm 0,01\text{mm}$
- 4) Контрола фреквенције кварцне плочице-импеданцметар:  
 $f=(1000\div 2000)\text{kHz}\pm 2\text{kHz}$
- 5) Контрола површине кварцне плочице-микроскоп: без рисева и структурних дефеката
- 6) Контрола чистоће кварцне плочице-методом контактнoг угао дејонизоване капи воде: добра (кап кваси површину плочице)
- 7) Контрола адхерентности филма Ag-селотејпом: добра (селотејп не подиже филм)
- 8) Контрола цемента-микроскоп: изглед цемента после жарења компактан
- 9) Контрола заптивености-bubble test: добра (без одвајања мехурића ваздуха)
- 10) Контрола параметара кристалне јединке-SAUNDERS: Фреквенција  $F_0=1\div 2\text{MHz}$ . Подешеност фреквенције на  $25^\circ\text{C}$  је  $\Delta F/F_0=\pm 2,5\text{ppm}$ . Радни температурни опсег  $(-55\div +90)^\circ\text{C}$ . Одступање фреквенције у радном температурном опсегу је  $\Delta F/F_0=\pm 25\text{ppm}$ . Серијска отпорност  $R_{1\text{max}}=110\Omega$ . Q-фактор  $\geq 100000$ . Толеранција динамичке капацитивности  $C1\pm 2\%$ .
- 11) Контрола споредних резонанција-3577A NETWORK ANALYZER: 1) до  $f=f_0+50\text{kHz}$  – без  $f_n$ ; 2) од  $f=f_0+50\text{kHz}$  –  $f_n>30\text{dB}$

Контролу извршио: Снежана Вишњић-пословођа



Одговорно лице: Радослав Јевтовић-директор



У Београду: 01.11. 2023.



## Листа раније прихваћених техничких решења за сваког аутора појединачно

### Ирини Рељин:

2022:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Пројектовање масивних биконвексних микроминијатурних кристалних јединки ниских фреквенција основне учестаности (3÷4) MHz засновано на примени принципа геометријске, Техничко решење - Ново техничко решење у фази реализације у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2022. **M85**

2021:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Минијатуризација кристалних јединки основне учестаности фреквенције 21.4MHz у циљу реализације филтра шестог реда у мањем кућишту, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Технолошки поступак подешавања фреквенције кристалних јединки са електродама од сребра електролитским наношењем никла-никловање, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2020:

1. М. Миливојевић, Д. Дујковић, М. Паскаш, А. Гавровска, **И. Рељин**, Б. Рељин, Софтвер за статистичку анализу COVID-19 података. Техничко решење – Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми – нови софтвер Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M85**

2. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 5MHz са електродама од злата, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

3. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 6MHz са електродама од сребра, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

2019:

1. С. Дедић Нешић, Л. Грубишић, И. Рељин, Б. Рељин, **Д. Дујковић**, Висококвалитетна микроминијатурна кварцна кристална јединка АТ-реза трећег овертона фреквенције 63MHz, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2019. **M81**

2. С. Дедић Нешић, Л. Грубишић, И. Рељин, Б. Рељин, **Д. Дујковић**, Висококвалитетна ултратанка микроминијатурна кварцна кристална јединка АТ-реза основне учестаности фреквенције 63MHz, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин - Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, Београд, Nov, 2019. **M81**

2018:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, Б. Рељин, **Д. Дујковић**, Микроминијатурне кристалне јединке АТ-реза основне учестаности фреквенције 45MHz, Институт Михајло Пупин, Београд, 2018. **M81**
2. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, И. Рељин, Б. Рељин, **Д. Дујковић**, Микроминијатурна кристална јединка АТ-реза петог овертона фреквенције 172,025MHz - гранични случај на прелазу са петог на седми овертон, Институт Михајло Пупин Београд, Београд, 2018. **M81**

2016:

1. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, И. Рељин, Д. Јевтић, **Д. Дујковић**, М. Паскаш, А. Гавровска, Технологија израде високостабилних кристалних јединки SC-реза: Механизми дегазације кућишта, 2016. **M83**

2015:

1. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, И. Рељин, **Д. Дујковић**, Д. Јевтић, А. Гавровска, Технологија израде високостабилних кристалних јединки СЦ-реза - инкапсулација, 2015. **M83**

## Ана Гавровска:

2022:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Пројектовање масивних биконвексних микроминијатурних кристалних јединки ниских фреквенција основне учестаности (3÷4) MHz засновано на примени принципа геометријске, Техничко решење - Ново техничко решење у фази реализације у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2022. **M85**

2021:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Минијатуризација кристалних јединки основне учестаности фреквенције 21.4MHz у циљу реализације филтра шестог реда у мањем кућишту, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Технолошки поступак подешавања фреквенције кристалних јединки са електродама од сребра електролитским наношењем никла-никловање, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2020:

1. М. Миливојевић, Д. Дујковић, М. Паскаш, **А. Гавровска**, И. Рељин, Б. Рељин, Софтвер за статистичку анализу COVID-19 података. Техничко решење – Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми – нови софтвер Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M85**

2. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 5MHz са електродама од злата, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

3. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 6MHz са електродама од сребра, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

2019:

1. С. Дедић Нешић, **Л. Грубишић**, И. Рељин, Б. Рељин, А. Гавровска, М. Славковић - Илић, Кристални филтар 76.8375 MHz реализован кристалима трећег овертона, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2019. **M81**

2016:

1. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, И. Рељин, Д. Јевтић, Д. Дујковић, М. Паскаш, **А. Гавровска**, Технологија израде високостабилних кристалних јединки SC-реза: Механизми дегазације кућишта, 2016. **M83**

2015:

1. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, И. Рељин, Д. Дујковић, Д. Јевтић, **А. Гавровска**, Технологија израде високостабилних кристалних јединки СЦ-реза - инкапсулација, 2015. **M83**



### **Драги Дујковић:**

2022:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Пројектовање масивних биконвексних микроминијатурних кристалних јединки ниских фреквенција основне учестаности (3÷4) MHz засновано на примени принципа геометријске, Техничко решење - Ново техничко решење у фази реализације у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2022. **M85**

2021:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Минијатуризација кристалних јединки основне учестаности фреквенције 21.4MHz у циљу реализације филтра шестог реда у мањем кућишту, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Технолошки поступак подешавања фреквенције кристалних јединки са електродама од сребра електролитским наношењем никла-никловање, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2020:

1. М. Миливојевић, Д. Дујковић, М. Паскаш, А. Гавровска, **И. Рељин**, Б. Рељин, Софтвер за статистичку анализу COVID-19 података. Техничко решење – Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генска проба, микроорганизми – нови софтвер Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M85**

2. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 5MHz са електродама од злата, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

3. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 6MHz са електродама од сребра, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

2019:

1. С. Дедић Нешић, Л. Грубишић, **И. Рељин**, Б. Рељин, **Д. Дујковић**, Висококвалитетна микроминијатурна кварцна кристална јединка АТ-реза трећег овертона фреквенције 63MHz, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2019. **M81**

2. С. Дедић Нешић, Л. Грубишић, **И. Рељин**, Б. Рељин, **Д. Дујковић**, Висококвалитетна ултратанка микроминијатурна кварцна кристална јединка АТ-реза основне учестаности фреквенције 63MHz, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин - Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, Београд, Nov, 2019. **M81**

3. С. Дедић Нешић, Л. Грубишић, **И. Рељин**, Б. Рељин, А. Гавровска, М. Славковић - Илић, Кристални филтар 76.8375 MHz реализован кристалима трећег овертона, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2019. **M81**

2018:

1. Л. Грубишић, **И. Рељин**, Б. Рељин, Д. Дујковић, Микроминијатурне кристалне јединке АТ-реза основне учестаности фреквенције 45MHz, Институт Михајло Пупин, Београд, 2018. **M81**
2. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, **И. Рељин**, Б. Рељин, Д. Дујковић, Микроминијатурна кристална јединка АТ-реза петог овертона фреквенције 172,025MHz - гранични случај на прелазу са петог на седми овертон, Институт Михајло Пупин Београд, Београд, 2018. **M81**

2016:

1. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, **И. Рељин**, Д. Јевтић, Д. Дујковић, М. Паскаш, А. Гавровска, Технологија израде високостабилних кристалних јединки SC-реза: Механизми дегазације кућишта, 2016. **M83**

2015:

1. Л. Грубишић, С. Дедић Нешић, **И. Рељин**, Д. Дујковић, Д. Јевтић, А. Гавровска, Технологија израде високостабилних кристалних јединки СЦ-реза - инкапсулација, 2015. **M83**

## Ленкица Грубишић:

2022:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Пројектовање масивних биконвексних микроминијатурних кристалних јединки ниских фреквенција основне учестаности (3÷4) MHz засновано на примени принципа геометријске, Техничко решење - Ново техничко решење у фази реализације у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2022. **M85**

2021:

1. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Минијатуризација кристалних јединки основне учестаности фреквенције 21.4MHz у циљу реализације филтра шестог реда у мањем кућишту, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2. Л. Грубишић, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Технолошки поступак подешавања фреквенције кристалних јединки са електродама од сребра електролитским наношењем никла-никловање, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2021. **M82**

2020:

1. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 5MHz са електродама од злата, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

2. **Л. Грубишић**, И. Рељин, А. Гавровска, Д. Дујковић, Мониторска план-конвексна кварцна кристална јединка фреквенције 6MHz са електродама од сребра, Техничко решење - Ново техничко решење примењено на националном нивоу у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2020. **M82**

2019:

1. С. Дедић Нешић, **Л. Грубишић**, И. Рељин, Б. Рељин, Д. Дујковић, Висококвалитетна микроминијатурна кварцна кристална јединка АТ-реза трећег овертона фреквенције 63MHz, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2019. **M81**

2. С. Дедић Нешић, **Л. Грубишић**, И. Рељин, Б. Рељин, Д. Дујковић, Висококвалитетна ултратанка микроминијатурна кварцна кристална јединка АТ-реза основне учестаности фреквенције 63MHz, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин - Универзитет у Београду - Електротехнички факултет, Београд, Nov, 2019. **M81**

3. С. Дедић Нешић, **Л. Грубишић**, И. Рељин, Б. Рељин, А. Гавровска, М. Славковић - Илић, Кристални филтар 76.8375 MHz реализован кристалима трећег овертона, Техничко решење - нови производ у оквиру пројекта TP-32048, Институт Михајло Пупин – Електротехнички факултет у Београду, Београд, Nov, 2019. **M81**

2018:

1. **Л. Грубишић**, И. Рељин, Б. Рељин, Д. Дујковић, Микроминијатурне кристалне јединке АТ-реза основне учестаности фреквенције 45MHz, Институт Михајло Пупин, Београд, 2018. **M81**

2. **Л. Грубишић**, С. Дедић Нешић, И. Рељин, Б. Рељин, Д. Дујковић, Микроминијатурна кристална јединка АТ-реза петог овертона фреквенције 172,025МХз - гранични случај на прелазу са петог на седми овертон, Институт Михајло Пупин Београд, Београд, 2018. **М81**

2016:

1. **Л. Грубишић**, С. Дедић Нешић, И. Рељин, Д. Јевтић, Д. Дујковић, М. Паскаш, А. Гавровска, Технологија израде високостабилних кристалних јединки SC-реза: Механизми дегазације кућишта, 2016. **М83**

2015:

1. **Л. Грубишић**, С. Дедић Нешић, И. Рељин, Д. Дујковић, Д. Јевтић, А. Гавровска, Технологија израде високостабилних кристалних јединки СЦ-реза - инкапсулација, 2015. **М83**