

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Pētījums

Nr. 4.5 “Tehnoloģiskie pētījumi un silīcija ražošana ar diametru līdz 100 mm izmantošanai vājstrāvas un lieljaudas mikroelektronikas cietvielu ierīcēs”

MAŠĪNBŪVES KOMPETENCES CENTRS

2021.gads

Anotācija.

AS ALFA RPAR ir veikusi firmas KEPP 4N0 3-9 460 un 4P1 7-13 460-20-5 monokristāliskā silīcija plāksnīšu novērtēšanu.

Tika salīdzinātas firmas KEPP un firmas TOPSIL Semiconductor Materials SA silīcija plāksnīšu elektrofizikālās īpašības. AS ALFA RPAR jau ilgstoši savā ražošanas procesā izmanto firmas TOPSIL Semiconductor Materials SA silīcija plāksnītes.

Pētījuma laikā:

1. Veikta monokristāliskā silīcija plāksnīšu leģējošā piemaisījuma vienmērīguma salīdzinošā novērtēšana (pēc īpatnējās pretestības).
2. Veikta monokristāliskā silīcija plāksnīšu nepamata lādiņnesēju dzīves ilguma salīdzinošā novērtēšana.
3. Pēc silīcija plāksnīšu termiskās oksidēšanas veikta Si – SiO₂ starpslāņa robežas dažu īpašību salīdzinošā novērtēšana.
4. Monokristāliskā silīcija plāksnīšu kvalitātes kompleksai novērtēšanai izstrādāts testa modulis (speciāla tranzistoru struktūra).
Izgatavota eksperimentālā partija. Veikta voltampēru raksturlīkņu un testa tranzistoru struktūras parametru salīdzinošā novērtēšana.
5. Lai veiktu monokristāliskā silīcija plāksnītēs skābekļa, oglekļa, dzelzs daudzuma novērtēšanu, tika veikti mērījumi ar ToF-SIMS (Time-of-flight Secondary Ion Mass spectrometry) metodi.
6. Izgatavotas mikroshēmas un tranzistori – silīcija kvalitātes novērtēšanai gala produktos.

1. Salīdzināmo plāksnīšu specifikācijas.

KEPP firmas monokristāliskā silīcija plāksnīšu kvalitāte tika vērtēta, salīdzinot to raksturlielumus ar Topsil Semiconductor Materials SA firmas plāksnītēm, kuras AS ALFA RPAR jau ilgāku laiku izmanto mikroierīču ražošanā.

Topsil Semiconductor Materials SA
n-tipa plāksnītes specifikācija

PRIME SILICON WAFERS

Details of specification

Material : CZ
Orientation : 100
Off degree : 0.0 +/- .5
Type/Dopant : n / Phosphorus
Resistivity Ω cm : 3 ÷ 9
RRV % : < 15 (ASTM plan B)
Oxygen at/cm³ : < 9 x 10⁻¹⁷
Diameter mm : 100 +/- 0.5
Thickness μ m : 460 +/- 20
TTV μ m : ≤ 10
WARP μ m : ≤ 40
Flats : SEMI
Primary flat location : 110 +/- degree
Primary flat length mm : 32.5 +/- 2.5
Secondary flat location : 180 +/- 5 degrees from Primary Flat
Secondary flat length mm : 18 +/- 2
Finish : Polished / Etched
Backside Sealing Å : none
Edge rounding : SEMI M1
Particles: ≤ 20 @ 0.3 μ m
Visual defects: none (visually perfect)
Other : According to Semi standards

Topsil Semiconductor Materials SA
p-tipa plāksnītes specifikācija

PRIME SILICON WAFERS

Details of specification

Material : CZ
Orientation : 111
Off degree : 4.0 +/- 0.5 toward 110 plane
Type/Dopant : p / Boron
Resistivity Ω cm : 7 ÷ 13
RRV % : < 10 (ASTM plan B)
Oxygen at/cm³ : < 9 x 10⁻¹⁷
Diameter mm : 100 +/- 0.5
Thickness μ m : 460 +/- 20
TTV μ m : ≤ 5
WARP μ m : ≤ 30
Flats : SEMI
Primary flat location : 110 +/- 0.5 degree

Primary flat length mm : 32.5 +/- 2.5
Secondary flat location : none
Secondary flat length mm : N/A
Finish : Polished / Etched
Backside Sealing Å : none
Edge rounding : 20 degrees SEMI M1
Particles: $\leq 20 @ 0.3 \mu\text{m}$
Visual defects: none (visually perfect)
Other : According to Semi standards

KEPP firmas
4N0 3-9 460 n-tipa plāksnītes specifikācija

Diameter : 100 +/-0.5 mm
Type/Dopant : n / Phosphorus
Orientation : 100
Resistivity $\Omega \text{ cm}$: $3 \div 9$
Finish : Polished / Etched
Thickness: 460 +/- 20 μm

KEPP firmas
4P1 7-13 460-20-5 p-tipa plāksnītes specifikācija

Diameter : 100 +/-0.5 mm
Type/Dopant : p / Boron
Orientation : 100
Resistivity $\Omega \text{ cm}$: $7 \div 13$
Finish : Polished / Etched
Thickness: 460 +/- 20 μm

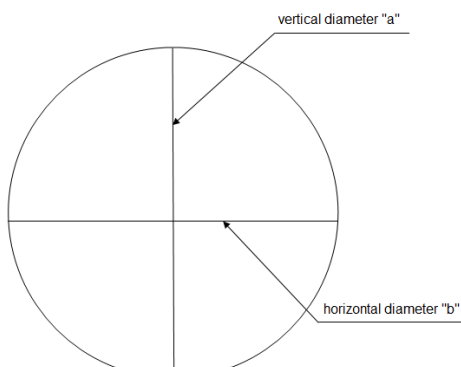
2. Monokristāliskā silīcija plāksnīšu leģējošā piemaisījuma vienmērīguma salīdzinošā novērtēšana.

Salīdzināšanai ir izraudzīta visas silīcija plāksnītes virsmas pārbaude ar četru zonžu metodi. Virsmas pretestības R_s un plāksnītes biezuma d mērījumi tika veikti sešpadsmit punktos pa vertikālo «a» un horizontālo «b» diametru (1.attēls).

No katras partijas plāksnītes tika ņemtas izmantojot nejaušības metodi. Pētījumā tika salīdzinātas desmit katra veida plāksnītes.

Īpatnējā pretestība ρ tika noteikta kā:
$$\rho = R_s \cdot d.$$

Virsmas pretestība R_s tika mērīta ar iekārtu Jandel ASMAT (Anglija). Mērījumu precizitāte ir 10%. Mērījumu rezultāti ir doti 1., 2.tabulā, grafikos un histogrammās.

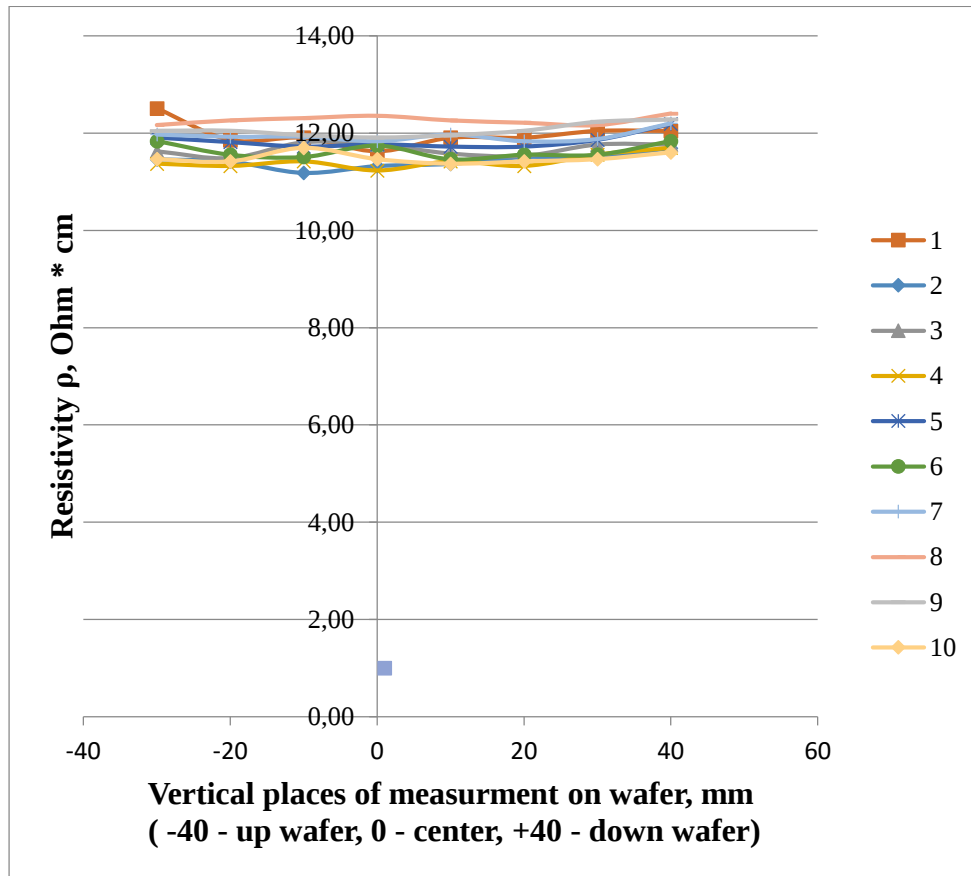


1.att. Silīcija plāksnītes shematiskais rasējums.

Table 1. Rs and ρ distribution for 4P1B X09149-0 (TOPSIL) wafers

Wafer	Surface resistivity Rs, Ω/sq ("a" and "b" diameters)									Wafer thickness, μm	Resistivity ρ , $\Omega\text{ cm}$ ("a" and "b" diameters)								ρ (medium), $\Omega\text{ cm}$, through diameter	ρ (medium), $\Omega\text{ cm}$, through wafer
1	a	269	255	256	250	256	256	259	259	465	12,51	11,86	11,9	11,63	11,9	11,9	12,04	12,04	11,97	12
	b	259	261	260	255	259	261	256	258	465	12,04	12,14	12,09	11,86	12,04	12,14	11,9	12	12,03	
2	a	247	246	241	244	245	248	248	252	464	11,46	11,41	11,18	11,32	11,37	11,51	11,51	11,69	11,43	11,44
	b	249	243	245	244	243	247	249	253	464	11,55	11,28	11,37	11,32	11,28	11,46	11,55	11,74	11,44	
3	a	250	247	254	253	249	248	253	253	465	11,63	11,49	11,81	11,76	11,58	11,53	11,76	11,76	11,67	11,61
	b	250	248	249	245	246	249	249	252	465	11,63	11,53	11,58	11,39	11,44	11,58	11,58	11,72	11,56	
4	a	244	243	245	241	245	243	248	251	466	11,37	11,32	11,42	11,23	11,42	11,32	11,56	11,7	11,42	11,38
	b	246	244	243	239	242	243	243	248	466	11,46	11,37	11,32	11,14	11,28	11,32	11,32	11,56	11,35	
5	a	255	253	251	252	251	251	254	261	467	11,91	11,82	11,72	11,77	11,72	11,72	11,86	12,19	11,84	11,84
	b	254	252	253	252	253	253	254	258	467	11,86	11,77	11,82	11,77	11,82	11,82	11,86	12,05	11,84	
6	a	254	248	247	252	246	248	248	254	466	11,84	11,56	11,51	11,74	11,46	11,56	11,56	11,84	11,63	11,3
	b	148	249	247	244	245	250	248	252	466	6,9	11,6	11,51	11,37	11,42	11,65	11,56	11,74	10,97	
7	a	258	257	257	255	258	255	256	263	464	11,97	11,92	11,92	11,83	11,97	11,83	11,88	12,2	11,94	11,91
	b	256	255	259	255	253	256	258	257	464	11,88	11,83	12,02	11,83	11,74	11,88	11,97	11,92	11,88	
8	a	260	262	263	264	262	261	260	265	468	12,17	12,26	12,31	12,36	12,26	12,21	12,17	12,4	12,27	12,26
	b	265	263	262	264	262	258	262	258	468	12,4	12,31	12,26	12,36	12,26	12,07	12,26	12,07	12,25	
9	a	258	258	256	255	256	258	262	263	467	12,05	12,05	11,96	11,91	11,96	12,05	12,24	12,28	12,06	12,12
	b	262	262	263	256	260	261	262	260	467	12,24	12,24	12,28	11,96	12,14	12,19	12,24	12,14	12,18	
10	a	246	245	251	246	244	245	246	249	466	11,46	11,42	11,7	11,46	11,37	11,42	11,46	11,6	11,49	11,47
	b	248	243	248	242	248	246	245	247	466	11,56	11,32	11,56	11,28	11,56	11,46	11,42	11,51	11,46	

Resistivity ρ distribution vs wafers 4P1B X09149-0 (TOPSIL)



Resistivity ρ distribution in intervals in % for wafers 4P1B X09149-0 (TOPSIL)

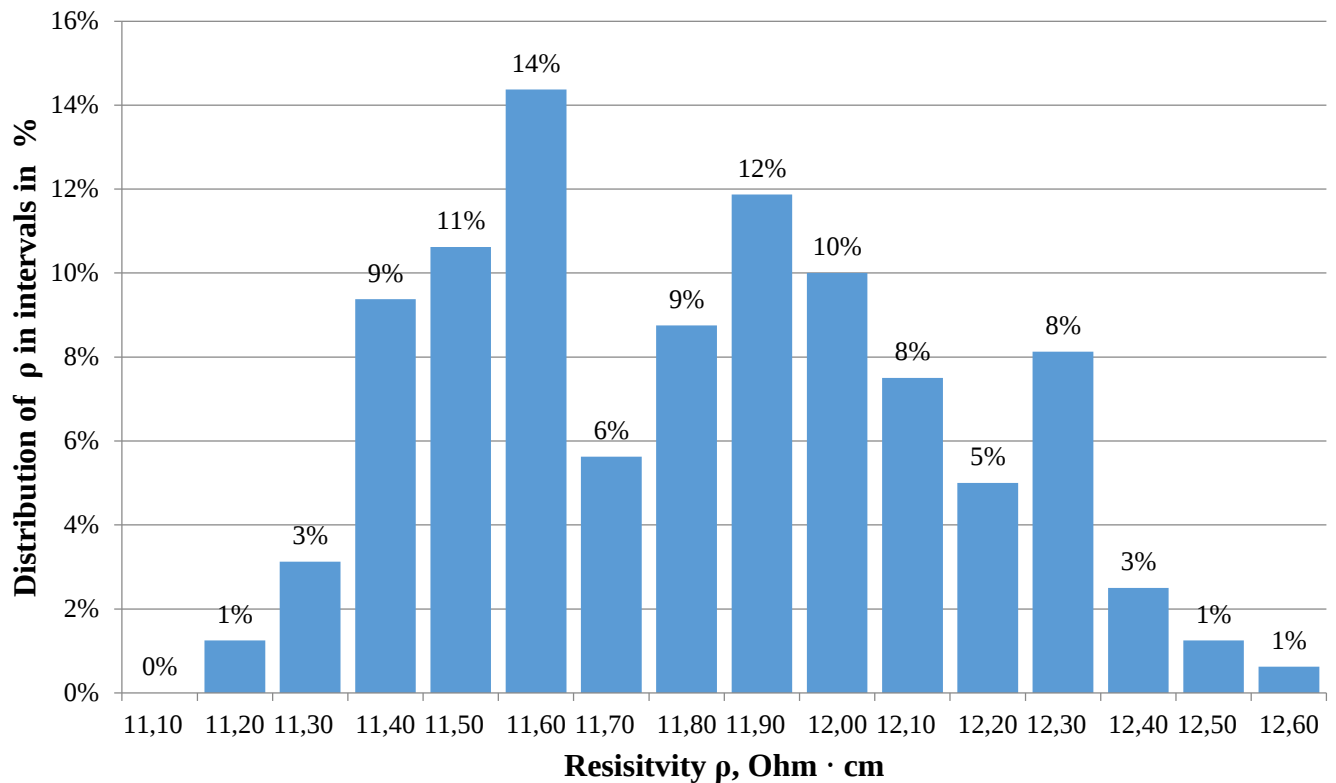
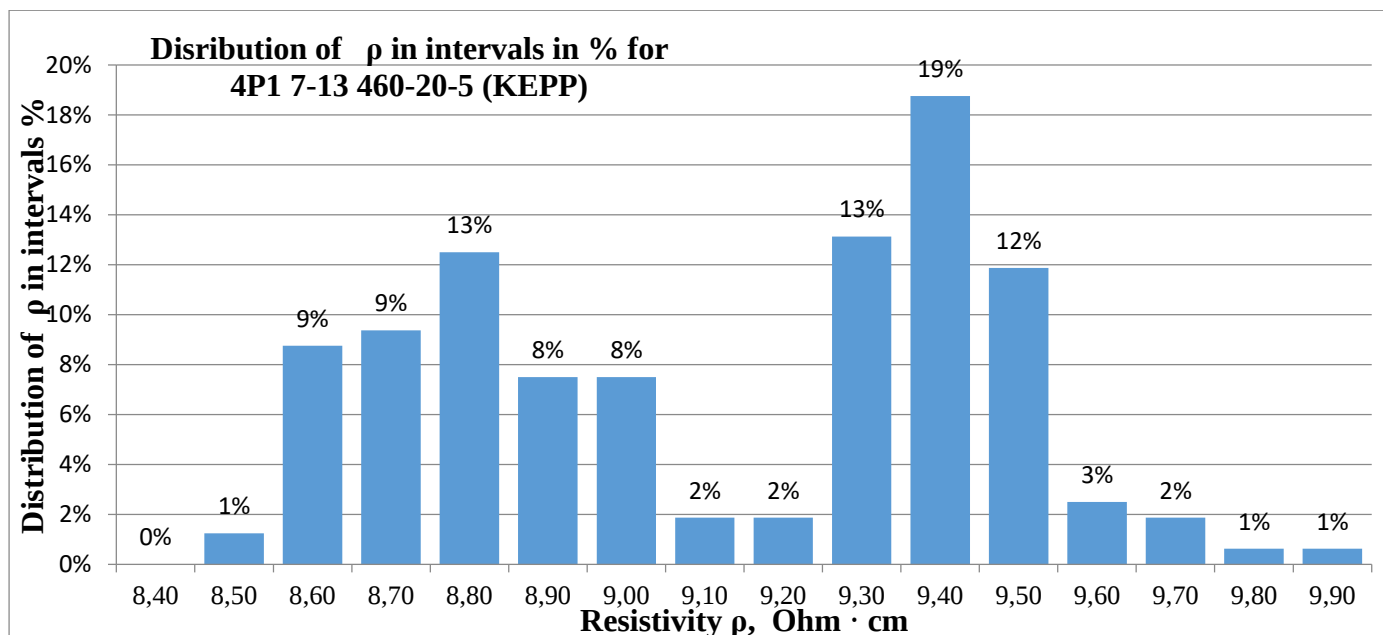
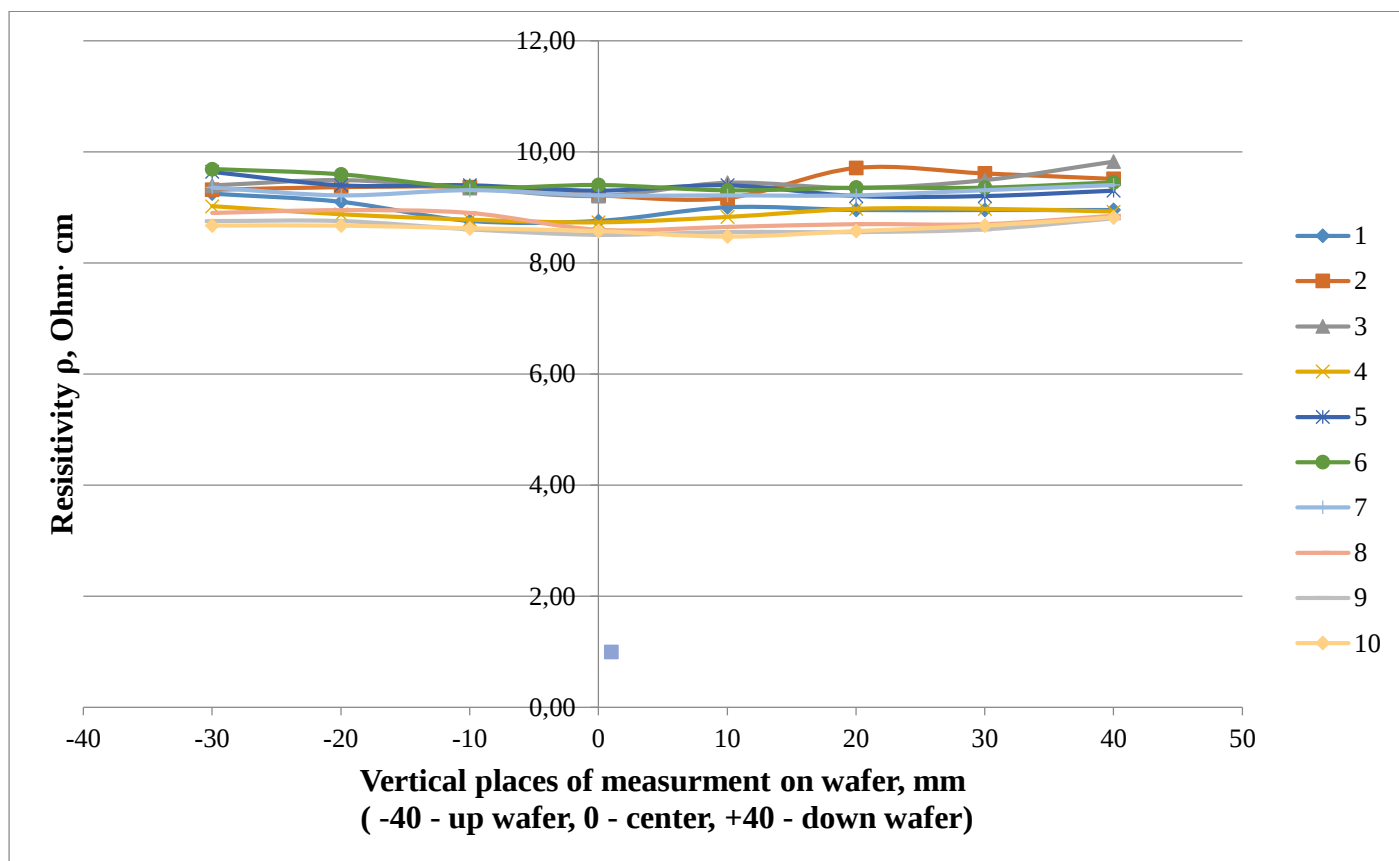
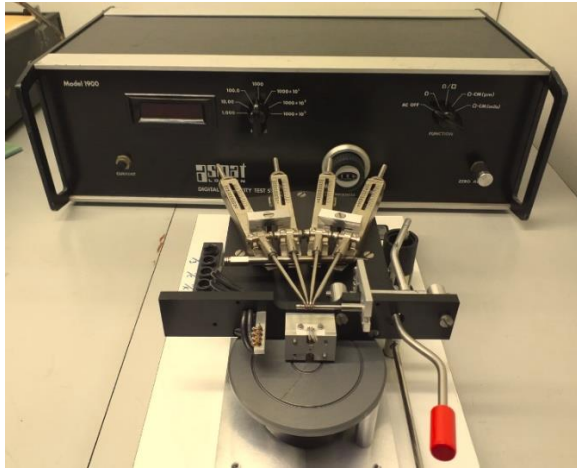


Table 2. R_s and ρ distribution for 4P1 7-13 460-20-5 (KEPP)

Wafer	Surface resistivity R_s , Ω /sq ("a" and "b" diameters)									Wafer thickness, μ m	Resistivity ρ , Ω cm ("a" and "b" diameters)									ρ (medium), Ω cm, through diameter	ρ (medium), Ω cm, through wafer
	a	b	a	b	a	b	a	b	a		a	b	a	b	a	b	a	b			
1	a	188	185	178	178	183	182	182	182	492	9,25	9,1	8,76	8,76	9	8,95	8,95	8,95	8,97	8,92	
	b	178	178	180	178	182	181	181	184	492	8,76	8,76	8,86	8,76	8,95	8,91	8,91	9,05	8,87		
2	a	189	190	190	187	186	197	195	193	493	9,32	9,37	9,37	9,22	9,17	9,71	9,61	9,51	9,41	9,39	
	b	190	190	188	189	188	192	191	192	493	9,37	9,37	9,27	9,32	9,27	9,47	9,42	9,47	9,37		
3	a	197	199	196	193	198	196	199	206	477	9,4	9,49	9,35	9,21	9,44	9,35	9,49	9,83	9,44	9,39	
	b	193	195	197	194	195	194	197	200	477	9,21	9,3	9,4	9,25	9,3	9,25	9,4	9,54	9,33		
4	a	186	183	181	180	182	185	185	184	485	9,02	8,88	8,78	8,73	8,83	8,97	8,97	8,92	8,89	8,85	
	b	182	182	181	180	180	182	183	184	485	8,83	8,83	8,78	8,73	8,73	8,83	8,88	8,92	8,81		
5	a	200	195	195	193	195	191	191	193	482	9,64	9,4	9,4	9,3	9,4	9,21	9,21	9,3	9,36	9,36	
	b	197	197	197	197	190	191	192	192	482	9,5	9,5	9,5	9,5	9,16	9,21	9,25	9,25	9,36		
6	a	204	202	197	198	196	197	197	199	475	9,69	9,6	9,36	9,41	9,31	9,36	9,36	9,45	9,44	9,44	
	b	200	197	199	199	195	202	199	198	475	9,5	9,36	9,45	9,45	9,26	9,6	9,45	9,41	9,43		
7	a	197	194	196	194	194	194	196	198	475	9,36	9,22	9,31	9,22	9,22	9,22	9,31	9,41	9,28	9,3	
	b	197	198	195	195	197	195	196	197	475	9,36	9,41	9,26	9,26	9,36	9,26	9,31	9,36	9,32		
8	a	178	179	178	172	173	174	174	177	500	8,9	8,95	8,9	8,6	8,65	8,7	8,7	8,85	8,78	8,73	
	b	173	173	171	172	172	175	175	179	500	8,65	8,65	8,55	8,6	8,6	8,75	8,75	8,95	8,69		
9	a	179	179	176	174	175	175	176	180	489	8,75	8,75	8,61	8,51	8,56	8,56	8,61	8,8	8,64	8,63	
	b	177	175	175	172	178	177	178	179	489	8,66	8,56	8,56	8,41	8,7	8,66	8,7	8,75	8,62		
10	a	177	177	176	175	173	175	177	180	490	8,67	8,67	8,62	8,58	8,48	8,58	8,67	8,82	8,64	8,63	
	b	177	176	175	175	176	175	176	178	490	8,67	8,62	8,58	8,58	8,62	8,58	8,62	8,72	8,62		

Resistivity ρ distribution vs wafers 4P1 7-13 460-20-5 (KEPP)





2.att. Virsmas pretestības mērīšanas iekārta Jandel ASMAT.

3. Monokristāliskā silīcija plāksnīšu Si-SiO₂ starpslāņa robežas parametru novērtēšana.

Silīcija plāksnīšu Si-SiO₂ starpslāņa robežas īpašību salīdzināšana tika veikta ar voltfaradu raksturliķņu metodi. Silīcija plāksnīšu paraugi vispirms tika tīrīti amonjaka peroksīda šķīdumā, mazgāti dejonizētā ūdenī un žāvēti. Pēc tam plāksnītes 1130°C temperatūrā, sausā skābekļa vidē, tika pakļautas termiskai oksidēšanai. Termiskā oksīda biezums ir 100nm. Plāksnītēm ar uzraudzētu SiO₂ oksīdu, izmantojot fotolitogrāfiju, tika veidots alumīnija kontakts.

Voltfaradu raksturliķnes tika mērītas sprieguma diapazonā $\pm 10V$. Pētāmo silīcija plāksnīšu paraugu voltfaradu raksturliķnes ir dotas 3., 4., un 5.attēlā.

Apzīmējumi grafikos:

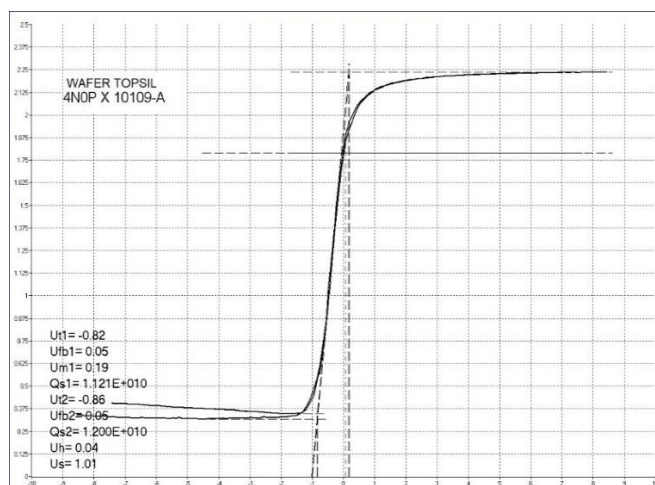
Ut – nogriešanas spriegums

Ufb – plakanās zonas spriegums

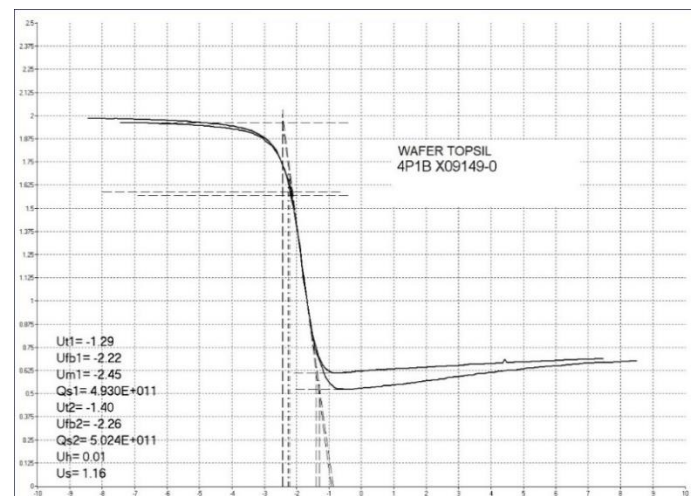
Um – horizontālās pieskares (maksimālās kapacitātes stāvoklī) un slīpās pieskares krustošanās punkts

Qs – pilna lādiņa blīvums, elektroni/cm²

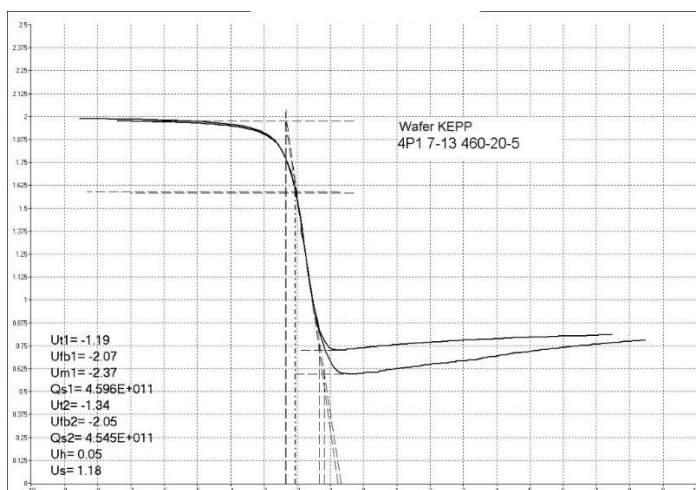
Us – tiešās pārejas raksturliķnes slīpums



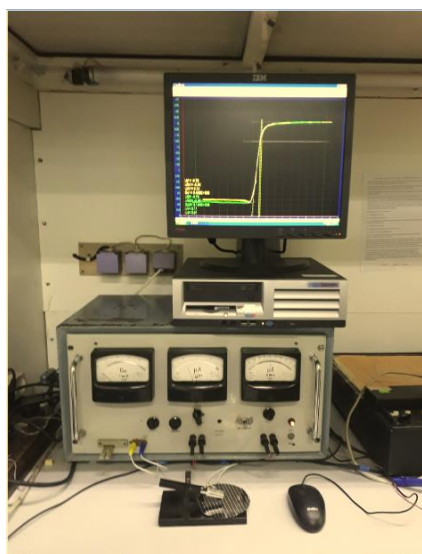
3.att. TOPSIL firmas n-tipa plāksnītes voltfaradu raksturliķne



4.att. TOPSIL firmas p-tipa plāksnītes voltfaradu raksturliķne



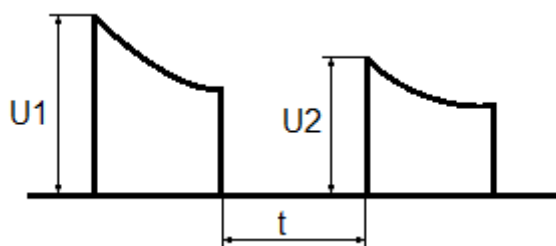
5.att. KEPP firmas p-tipa plāksnītes voltfaradu raksturlīkne



6.att. Voltfaradu raksturlīkņu mērīšanas iekārta.

4. Monokristāliskā silīcija plāksnīšu nepamata lādiņnesēju dzīves ilguma salīdzinošā novērtēšana.

Salīdzināšanai ir izraudzīta silīcija plāksnīšu nepamata lādiņnesēju dzīves ilguma pārbaude punktveida kontaktā, pielietojot vadītspējas modulācijas metodi (saskaņā ar ГOCT 19658-81). Šajā metodē plāksnītes punktveida kontaktā, tiešajā virzienā, sūta divus laikā nobīdītus strāvas impulsus. Oscilogrāfa ekrānā var redzēt, ka impulsu sūtīšanas laikā, paraugā krīt spriegums. Sprieguma impulsa forma punktveida kontaktā, veicot vadītspējas modulāciju ar inžektējamiem nesējiem, shematiski parādīta 7.attēlā.



7.attēls

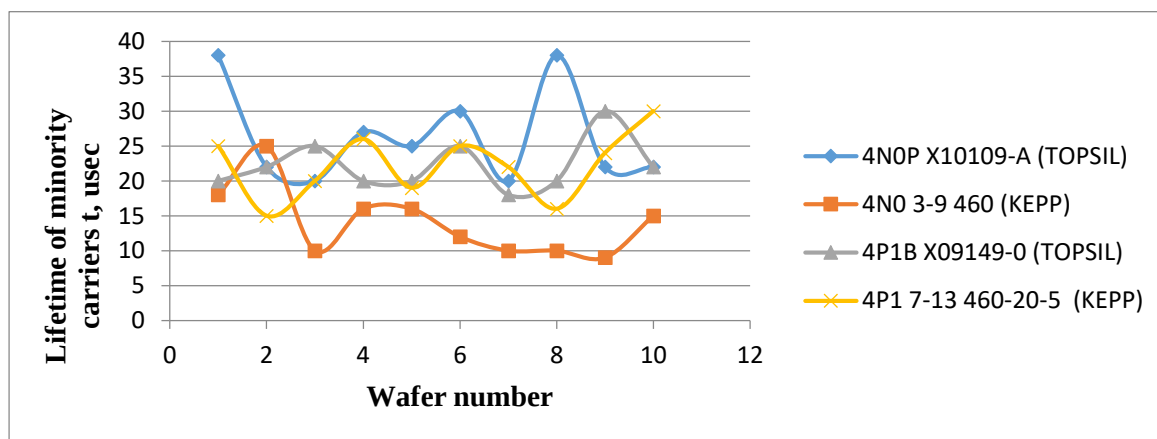
Momentā, kad tiek padots pirmais (inžektējošais) impulss, paraugā ievada līdzsvara lādiņnesējus, kas palielina parauga vadītspēju. Inžektējošā impulsa beigās, rekombinācijas rezultātā, līdzsvara lādiņnesēju skaits samazinās. Iepriekš minētā dēļ kontakta pretestība atgriežas sākotnējā vērtībā un laika gaitā palielinās. Otrā (mērīšanas) impulsa laikā spriegumu paraugā nosaka paraugā saglabājušos līdzsvara lādiņnesēju koncentrācija. Šādos gadījumos sprieguma kritums U_2 , mērīšanas impulsa sākumā, būs impulsu aiztures laika funkcija t . Līdzsvara lādiņnesēju dzīves ilgumu τ aprēķina pēc formulas:

$$\tau = \frac{t}{2,3 \lg \Delta U}$$

Salīdzinošās novērtēšanas laikā mērījumi tika veikti plāksnīšu piecos punktos, kā arī tika aprēķināts to vidējais lielums. Līdzsvara lādiņnesēju dzīves ilguma mērīšanas iekārta ir izveidota no standartierīcēm (9.attēls).

Table 3. Lifetime of minority carriers for wafers with different types of conductivity

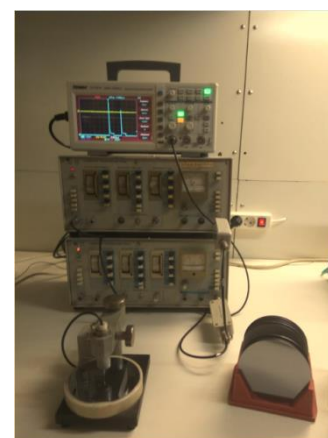
Wafer type	Wafer specification	Lifetime of minority carriers t , (measured on 10 wafers)									
n - type	4NOP X10109-A (TOPSIL)	38	22	20	27	25	30	20	38	22	22
	4NO 3-9 460 (KEPP)	18	25	10	16	16	12	10	10	9	15
p - type	4P1B X09149-0 (TOPSIL)	20	22	25	20	20	25	18	20	30	22
	4P1 7-13 460-20-5 (KEPP)	25	15	20	26	19	25	22	16	24	30



Nepamata lādiņnesēju dzīves ilguma sadalījums uz plāksnītes.



8.att. Strāvas impulsu oscilogrāfiskais attēlojums



9.att. Nepamata lādiņnesēju dzīves ilguma mērīšanas iekārta

5. Monokristālisko silīcija plāksnīšu skābekļa, oglekļa un dzelzs daudzuma salīdzināmie dati.

Monokristāliskā silīcija plāksnītēs tika mērīts skābekļa (O₂), oglekļa (C) un dzelzs (Fe) daudzums. Mērījumi tika veikti ar sekundāro jonu masas spektrometrijas metodi – SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry). Mērījumus veica ar ION-TOF spektrometru.

4.tabula

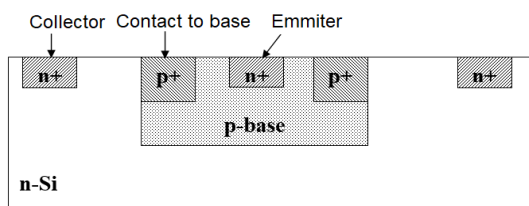
Nr. p.k.	Silīcija marta	Parauga marķējums	O ₂ koncentrācija, cm ⁻³	C koncentrācija, cm ⁻³	Fe koncentrācija, cm ⁻³
1.	4N0P X10109-A	TS-KЭФ-9	$6 \cdot 10^{17}$	$2,25 \cdot 10^{16}$	$2,25 \cdot 10^{16}$
2.	4P1B X09149-0	TS-KДБ-9	$6 \cdot 10^{17}$	$2,25 \cdot 10^{16}$	$2,25 \cdot 10^{16}$
3.	4N0 3-9 460 (KEPP)	TR-KЭФ-9	$6,5 \cdot 10^{17}$	$2,88 \cdot 10^{16}$	$2,53 \cdot 10^{16}$
4.	4P1 7-13 460-20-5 (KEPP)	TR-KДБ-10	$6,19 \cdot 10^{17}$	$2,27 \cdot 10^{16}$	$1,93 \cdot 10^{16}$

6. Silīcija kvalitātes novērtēšana pusvadītāju struktūrās.

Silīcija kvalitāte tika vērtēta sērijveida izstrādājumu, operacionālo pastiprinātāju, izmēģinājumu partijā. Tā kā pastiprinātāji tiek izstrādāti, ņemot vērā, ka ir iespējama būtiska deviācija materiālu īpašībās un novirze tehnoloģiskajā procesā, iegūtie paraugi neparādīja būtisku atšķirību starp pētāmo (KEPP firmas) silīciju un „parasto” (TOPSIL Semiconductor Materials SA firmas) silīciju.

Lai veiktu precīzāku salīdzinošo novērtējumu, tika pieņemts lēmums veikt bipolāro tranzistoru voltampēru raksturlīkņu parametru vērtēšanu. Šim nolūkam pētījuma gaitā tika izstrādāta speciāla tranzistoru testa struktūra. Parametri tika vērtēti n-p-n tipa struktūrām.

n-p-n struktūras tranzistora šķērsgriezums redzams 10.attēlā.



10.att. n-p-n struktūras tranzistora šķērsgriezums

Tranzistoru konstruktīvie parametri

- emitera laukums 70 x 100 μm
- bāzes laukums 90 x 300 μm
- pasīvās bāzes biezums 3,0 μm, īpatnējā pretestība $R_s = 130 \Omega \cdot \text{cm}$
- emitera biezums 2,2 μm, īpatnējā pretestība $R_s = 3,5 \Omega \cdot \text{cm}$
- aktīvās bāzes pinch rezistora pretestība 15-20 Ω

Plāksnīšu partija bija veidota no standarta plāksnītēm (TOPSIL firmas) un pētāmām plāksnītēm (KEPP firmas). Tādējādi visas iepriekš minētās plāksnītes tika pakļautas vienādiem procesiem. Pēc izgatavošanas plāksnītēs tika mērīts:

Strāvas pastiprināšanas koeficients
Kolektora-emitera caursites spriegums
Kolektora-bāzes caursites spriegums

Mērījumu rezultāti doti 5., 6.tabulā un histogrammās.

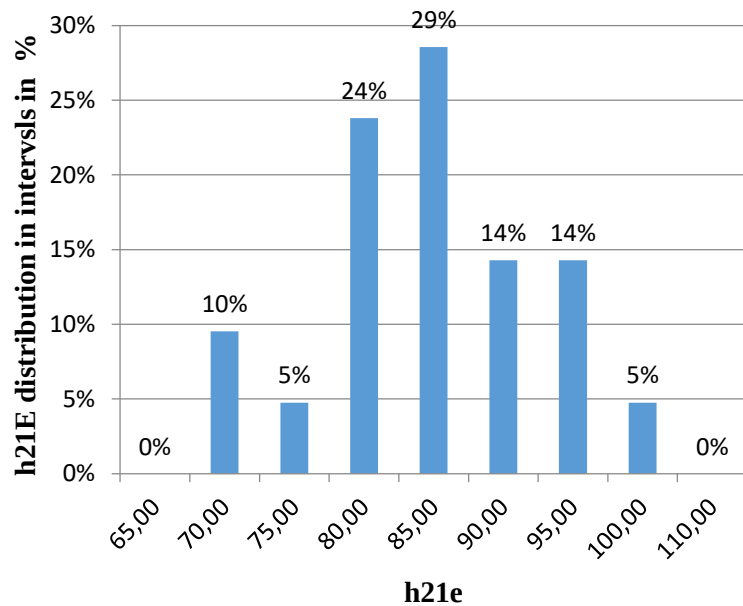
Table 5. Measurement of npn BJT manufactured on TOPSIL wafers

Parameter	Name	Wafers 4N0P X10109-A																					
Current amplification	h_{21E}	90	70	85	90	85	85	80	95	80	90	75	95	70	85	85	100	85	95	80	80	80	90
Break voltage U_{ce} , V	U_{ce}	70	70	67	70	68	68	67	70	70	70	68	65	65	65	65	67	67	68	68	69	68	67
Break voltage U_{cb} , V	U_{cb}	92	94	85	80	82	80	82	82	78	82	80	80	80	78	77	78	78	78	78	78	76	77

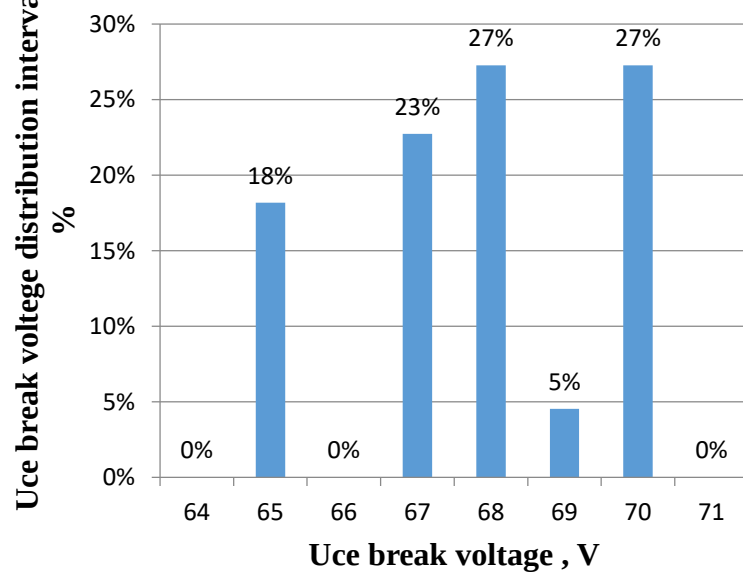
Table 6. Measurement of npn BJT manufactured on KEPP wafers

Parameter	Name	Wafers 4N0 3-9 460																					
Current amplification	h_{21E}	55	50	60	70	75	80	75	80	75	80	75	70	70	80	75	75	80	75	75	65	65	60
Break voltage U_{ce} , V	U_{ce}	70	71	69	69	70	71	70	70	70	70	69	69	70	70	71	69	70	69	73	73	71	72
Break voltage U_{cb} , V	U_{cb}	77	78	76	79	79	78	77	77	77	80	78	77	78	78	79	78	78	78	77	78	79	79

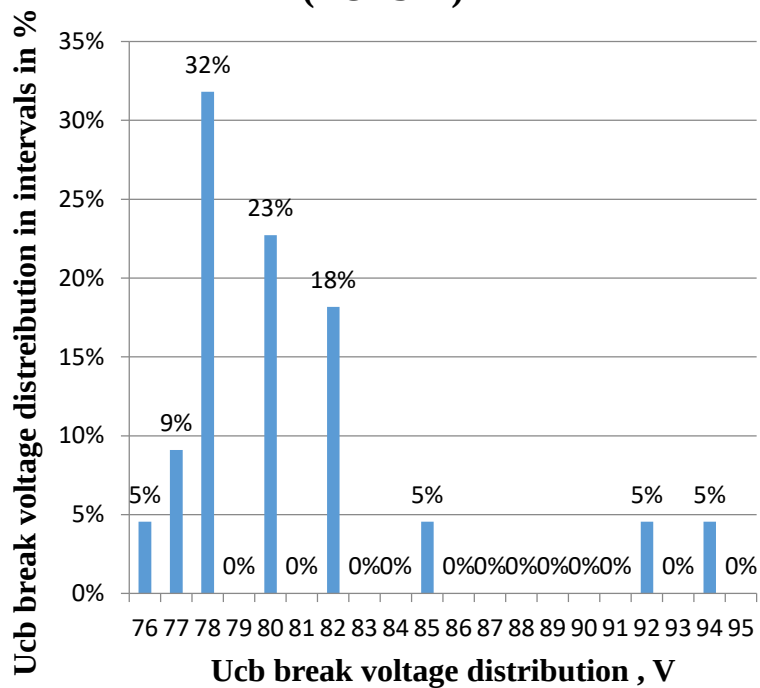
**h21e distribution in intervals in % for
4N0P X10109-A (TOPSIL)**



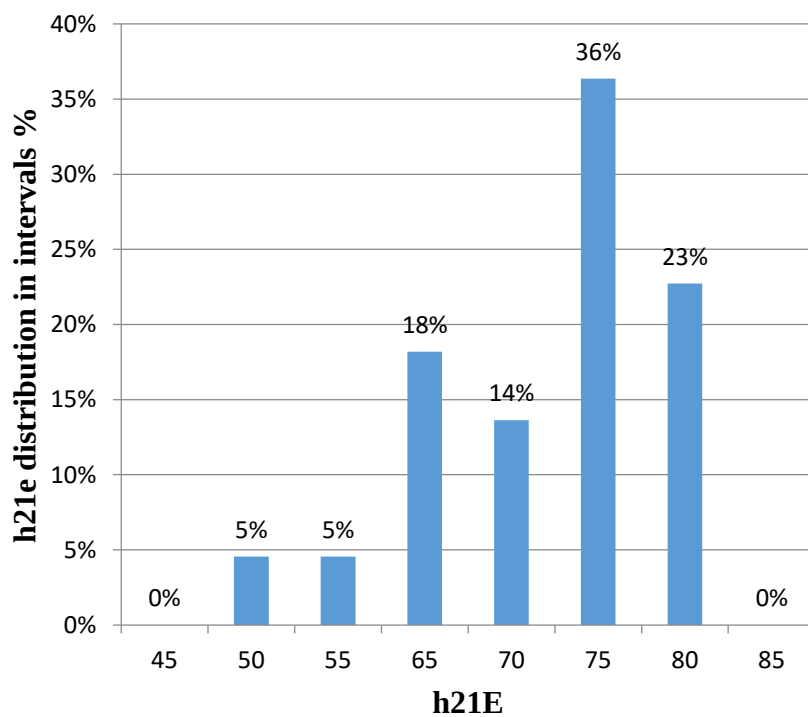
**Uce break voltage distribution in
intervals in % 4N0P X10109-A
(TOPSIL)**



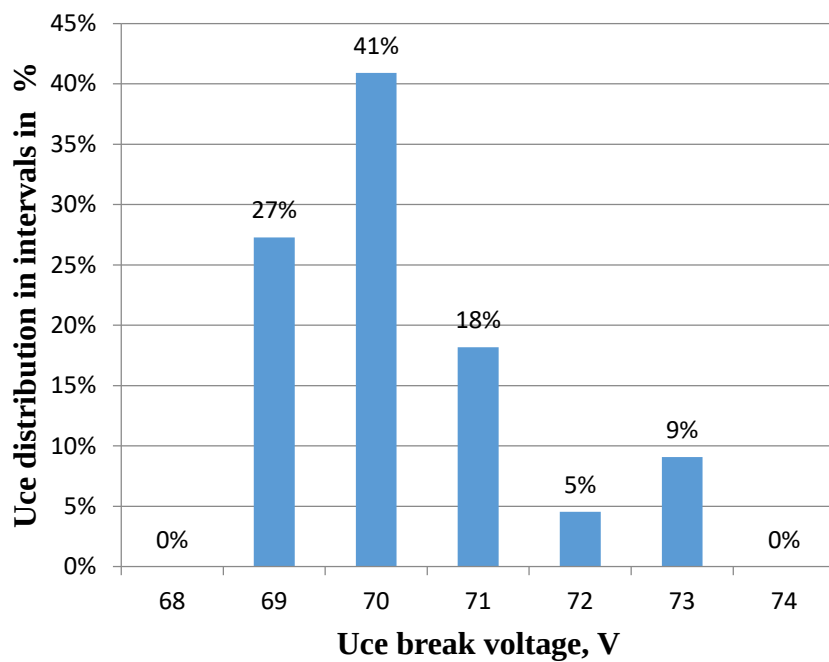
Ucb break voltage distribution in intervals in % 4N0P X10109-A (TOPSIL)



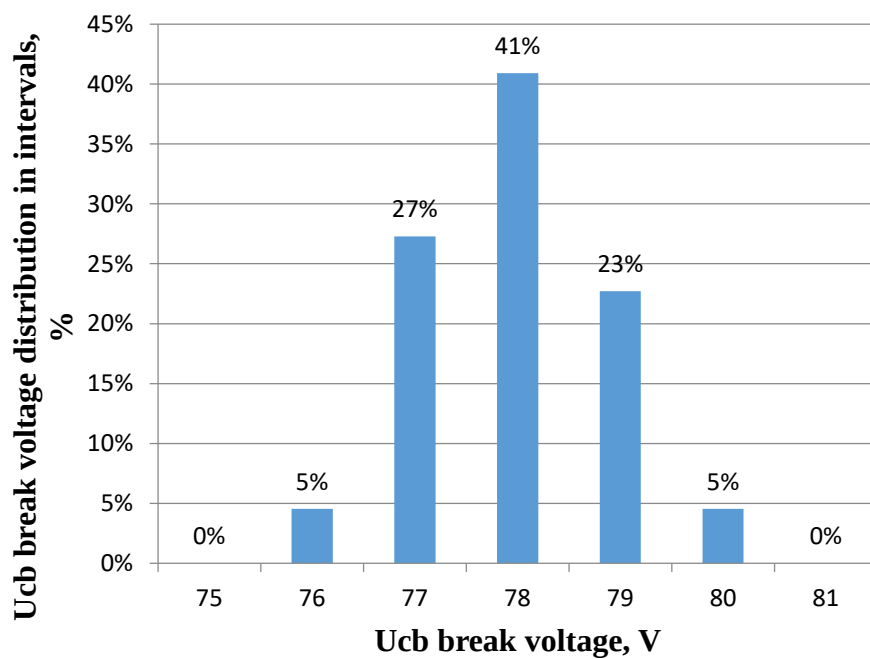
H21e distribution in intervals in % for 4N0 3-9 460 (KEPP)



**Uce distribution in % in intervals for 4N0
3-9 460 (KEPP)**



**Ucb break voltage distribution in % in
intervals for 4N0 3-9 460 (KEPP)**



Secinājumi.

Veiktais firmas Topsil Semiconductor Materials SA un firmas KEPP plāksnīšu monokristāliskā silīcija parametru un kvalitātes salīdzinošais novērtējums parādīja, ka to silīcija kvalitāte un parametri ir vienā līmenī.

Firmas Kepp plāksnēm caursītes spriegumu sadalījums ir manāmi mazāk "izplūdis", kas ļauj masveida ražošanā sagaidīt palielinātu procentuālo iznākumu.

Firmas KEPP monokristāliskā silīcija parametri un kvalitāte nav zemāka kā AS ALFA RPAR mikroshēmu un pusvadītāju ierīču ražošanā izmantojamā firmas TOPSIL silīcija kvalitāte un parametri.

Pilnīgākai silīcija kvalitātes novērtēšanai nepieciešams veikt plāksnīšu masveida pārbaudi sērijveida ražošanā. Ir jāvērtē to tehniski ekonomiskie rādītāji, drošums un izgatavoto pusvadītāju ierīču un mikroshēmu ilgzinātība.