

Latvijas Universitāte
Fizikas un matemātikas fakultāte
Fizikas maģistra 1.kursa students
Raimonds Narņickis (rn11038)

Nepārtrauktas vides fizikas laboratorija

Laboratorijas darba nr. 9

Virpulstrāvas plānā elektrovadošā plāksnē

Darba uzdevumi

1. Magnētiskā šķērslauka inducētā strāvu sadalījuma pētīšana 2 mm biezai alumīnija plāksnei.
 - a. Ar magnētiskā lauka sensoru, kas novietots uz plāksnes virsmas, noteikt magnētiskā lauka x komponentes sadalījumu pa x asi ($y = 0$) tuvu plāksnes virsmas. Šai nolūkā mērīt kontūrā inducēto EDS pie induktora strāvas efektīvās vērtības $I_{sp-eff} = 0,4 A$ un 3 pasniedzēja norādītām frekvences vērtībām no “komplekta” 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 Hz;
 - b. No izmērītajām sensora sprieguma vērtībām aprēķināt magnētiskā lauka x komponentes sadalījumu pa x asi pie plāksnes virsmas visām trim frekvencēm. No magnētiskā lauka sadalījuma aprēķināt lineārā strāvas blīvuma y komponentes efektīvās vērtības sadalījumu plāksnē pa x asi, proporcionāli pārrēķinot vērtības 1A induktora strāvai un attēlot strāvu $j_{l,y,eff}(x)$ sadalījumus grafiski (3 līknes vienā grafikā).
 - c. Aprēķināt katrai frekvencei bezdimensionālo šķērslauka frekvenci Ω un attēlot grafiski strāvas lineārā blīvuma moduļa maksimālās efektīvās vērtības atkarību no Ω . Salīdzināt eksperimentāli iegūto atkarību (atsevišķi punkti grafikā katrai frekvencei) ar tuvinātajā šķersindukcijas analizē iegūto plāksnē inducētās strāvas atkarību no Ω . Piezīme: veidot vienu grafiku 1c) un 2c) rezultātiem, vienādi mērogojot eksperimentālos punktus.
 - d. Salīdzināt eksperimentāli noteiktā un 1A induktora strāvai pārrēķinātā lineārā strāvas blīvuma moduļa y komponentes sadalījumu $j_{l,y,eff}(x)$ plāksnē pa x asi ar datormodelēšanas rezultātiem 2000 Hz frekvencei.
2. Magnētiskā šķērslauka inducētā strāvu sadalījuma pētīšana 0.01 mm biezai alumīnija folijai.
 - a. Ar magnētiskā lauka sensoru, kas novietots uz plāksnes ar foliju virsmas, noteikt magnētiskā lauka x komponentes sadalījumu pa x asi ($y = 0$) tuvu plāksnes virsmas. Šai nolūkā mērīt kontūrā inducēto EDS pie induktora strāvas efektīvās vērtības $I_{sp-eff} = 0,1 A$ un 3 pasniedzēja norādītām frekvences vērtībām no “komplekta” 10, 15, 20, 30, 50, 100 kHz. Izmantojot divstaru sciloskopu, kurā bez sensora signāla tiek attēlots arī induktora strāvas signāls, noteikt fāzu nobīdi starp magnētisko lauku un strāvu induktorā, tai sensora pozīcijai, kura atbilst maksimumam magnētiskā lauka sadalījumā;
 - b. No izmērītajām sensora sprieguma vērtībām aprēķināt magnētiskā lauka x komponentes sadalījumu pa x asi pie plāksnes virsmas visām trim frekvencēm. No magnētiskā lauka sadalījuma aprēķināt lineārā strāvas blīvuma y komponentes efektīvās vērtības sadalījumu plāksnē pa x asi, proporcionāli pārrēķinot vērtības 1A induktora strāvai un attēlot strāvu $j_{l,y,eff}(x)$ sadalījumus grafiski (3 līknes vienā grafikā). Izmantojot iepriekš noteikto fāzu nobīdi starp strāvu induktorā un izmērīto magnētisko lauku punktā, kur ir lauka maksimums, noteikt lineārā strāvas blīvuma reālo $j_{Re,l,y,eff}(x)$ un imagināro $j_{Im,l,y,eff}(x)$ daļu (pieņemot, ka strāva induktorā ir tikai ar reālo komponenti) un attēlot grafiski.
 - c. Aprēķināt katrai frekvencei bezdimensionālo šķērslauka frekvenci Ω un attēlot grafiski strāvas lineārā blīvuma moduļa maksimālās efektīvās vērtības atkarību no Ω . Salīdzināt eksperimentāli iegūto atkarību (atsevišķi punkti grafikā katrai frekvencei) ar tuvinātajā šķersindukcijas analizē iegūto plāksnē inducētās strāvas atkarību no Ω . Piezīme: veidot vienu grafiku 1c) un 2c) rezultātiem, vienādi mērogojot eksperimentālos punktus.

- d. Salīdzināt eksperimentāli noteiktā un 1A induktora strāvai pārrēķinātā lineārā strāvas blīvuma moduļa y komponentes sadalījumu $j_{l,y,eff}(x)$ plāksnē pa x asi ar datormodelēšanas rezultātiem 10kHz Hz frekvencei.

Darba piederumi

- Signāļģenerators Г3-33, 20Hz – 200kHz.
- Divstaru oscilogrāfs BK PRECISION 2121.
- Magnētiskā lauka sensors, šķērsriezuma laukums 2.5mm x 26.5mm, 154 vijumi.
- Alumīnija plāksne, 2mm biezums.
- Alumīnija folija, 0.01mm uz plastmasas plāksnes.
- Divu induktoru (spoļu) ar 23 vijumiem katrā sistēma ar plāksnes turētājiem.

Teorijas apskats

Šajā darbā elektrovadošas plāksnes tuvumā tiek radīts mainīgs magnētiskais lauks un tiek mērītas plāksnē inducētās virpuļstrāvas. Šo virpuļstrāvu EDS ir proporcionāls magnētiskā lauka frekvencei, tā indukcijai un kontūra laukumam. Eksperimentā kā magnētiskā lauka sensors tika izmantota indukcijas spole. Nomērot spriegumu sensorā var iegūt magnētiskā lauka indukcijas vērtību.

$$B_{x;eff} = \frac{U_M}{2\sqrt{2}\pi f S_M N_M}, U_M - \text{sprieguma maksimālā vērtība}, N_M - \text{mērspoles tinumu skaits}, S_M - \text{mērspoles laukums}.$$

Zinot magnētiskā lauka stiprumu var aprēķināt virpuļstrāvu strāvas blīvumu uz 1 Ampēru.

$$j_{1A} = \frac{2B_{x;eff}}{\mu_0 I}$$

Darbā tiek izmantots parametrs bezdimensionālā šķērslauka frekvence:

$$\Omega = \frac{dL\sigma f\mu_0}{2}, d - \text{plāksnes biezums}, L - \text{spoles platums}, \sigma - \text{vadītspēja}$$

Plāksnē plūstošās strāvas un divkāršas spoles strāvas attiecība atkarībā no bezdimensionālās šķērslauka frekvences ir

$$\frac{I_{pl}}{2I_{sp}} = -\frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2} + i\frac{\Omega}{1 + \Omega^2}$$

ko var izmantot, lai analizētu plāksnē plūstošās strāvas dabu pie dažādiem parametriem.

Un tās modulis.

$$\left| \frac{I_{pl}}{2I_{sp}} \right| = \frac{\Omega}{\sqrt{1 + \Omega^2}}$$

Darba dati un to apstrāde

Eksperimenta rezultātu tabulas ir apkopotas pielikumā

Tabula 1 Relatīvās kļūdas spriegumam un frekvencei

f, Hz	δ , m
300	4.71E-03
500	3.65E-03
1200	2.36E-03
10000	8.10E-04
20000	5.77E-04
100000	2.58E-04

Tabula 2 Skinslānis atkarībā no frekvences

r_{UM}	4%
r_f	1%

Tabula 3 Darbā izmantotie parametri bezdimensionālās šķērslauka frekvences aprēķinam

d_{pl}	2.00E-05	m
d_{al}	1.00E-05	m
L	0.228	m
σ	3.80E+07	S/m

Lauks tika aprēķināts izmantojot

$$B_{x;eff} = \frac{U_M}{2 \sqrt{2} \pi f S_M N_M}$$

$$S_M = 6.625 * 10^{-5} (m^2)$$

$$N_M = 154$$

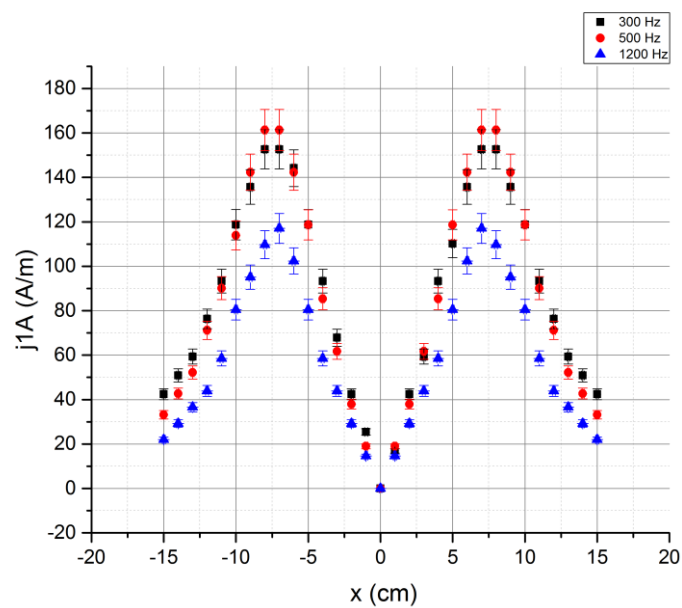
Strāvas lineārais blīvums uz 1 Ampēru tika aprēķināts

$$j_{y;eff} = \frac{2B_{x;eff}}{\mu_0 I}$$

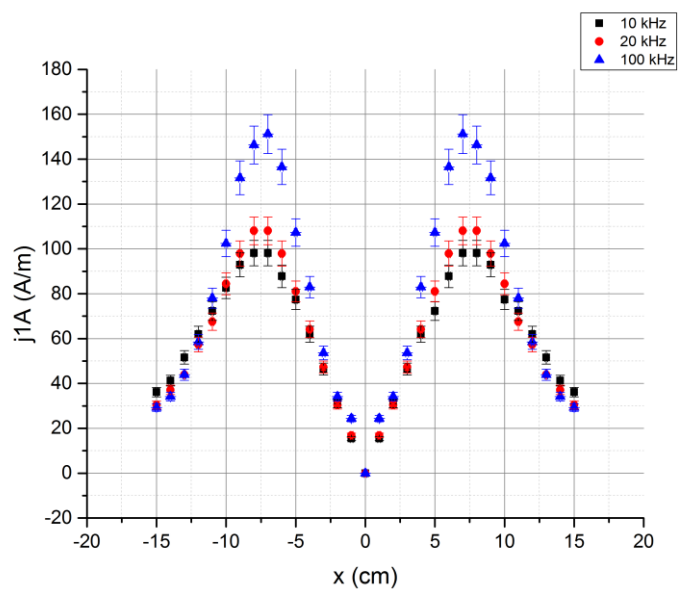
I – strāva, kura tika turēta konstanta

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \mu f \sigma}}$$

Kļūdas tiek aprēķinātas izmantojot relatīvo kļūdu saskaitīšanas metodi.



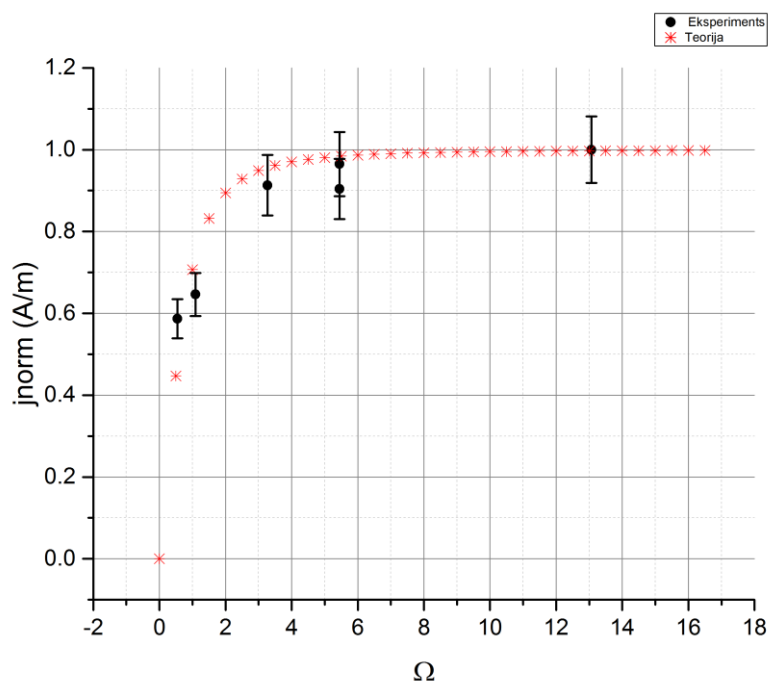
Grafiks 1 Strāvas blīvums uz 1 Ampēru atkarībā no koordinātes (plāksnei)



Grafiks 2 Strāvas blīvums uz 1 Ampēru atkarībā no koordinātes (folijai)

Tabula 4 Maksimālie strāvas blīvumi un to normētās vērtības

f, kHz	j_{\max} , A/m	j_{norm} , A/m	Δj_{norm} , A/m	Ω	$ I_{pl}/2I_{sp} $
0.3	152.7	0.91	0.07	3.27	0.96
0.5	161.3	0.96	0.08	5.44	0.98
1.2	167.2	1.00	0.08	13.07	1.00
10	98.1	0.59	0.05	0.54	0.48
20	108.0	0.65	0.05	1.09	0.74
100	151.2	0.90	0.07	5.44	0.98



Grafiks 3 Normētā strāvas blīvuma atkarība no bezdimensionālās šķērslauka frekvences.

Teorētiskā līkne tika iegūta izmantojot sakarību

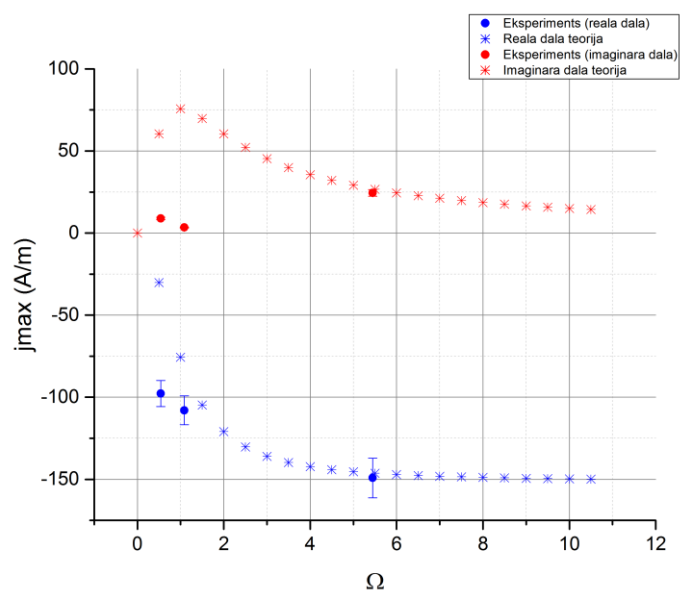
$$\left| \frac{I_{pl}}{2I_{sp}} \right| = \frac{\Omega}{\sqrt{1 + \Omega^2}}$$

Un attiecīgi y ass vērtības grafika tika iegūtas mērogojot j_{\max} pret lielāko vērtību.

Tabula 5 Imaginārās un reālās daļas aprēķins strāvas blīvumam (folijai)

f , kHz	j _{max} , A/m	Ω	φ	j _{Re} , A/m	Δj _{Re} , A/m	j _{Im} , A/m	Δj _{Im} , A/m
10	98.1	0.5	174.8	-97.7	5.6	8.9	0.5
20	108.0	1.1	178.2	-108.0	6.2	3.4	0.2
100	151.2	5.4	170.7	-149.2	8.6	24.4	1.4

$$Re\left(\frac{I_{pl}}{2I_{sp}}\right) = -\frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2}, \quad Im\left(\frac{I_{pl}}{2I_{sp}}\right) = \frac{\Omega}{1 + \Omega^2}$$



Grafiks 4 Alumīnija folijas strāvas blīvuma maksimālās vērtības imagināra un reāla daļa

Secinājumi

Noteiktie strāvas blīvuma sadalījumi pēc formas atbilst darba aprakstā dotajiem. Alumīnija folijas gadījumā strāvas blīvums pieaug palielinot frekvenci.

No 3. grafika redzams, ka normētie dati labi sakrīt ar teorētisko līkni.

No 4. grafika redzams, ka imaginārā daļa strāvas blīvumam ir mazāka par reālo, ka tika iegūts darba aprakstā apskatītajā datormodelī. Datu punkti nesakrīt ar teorētisko līkni, imaginārai daļai ir mazākas kļūdas nekā reālajai daļai, iespējams, ka jāņem vērā arī noteiktās fazu nobīdes kļūda, kā arī bezdimensionālās šķērslauka frekvences kļūda.

Izmantotā literatūra

- Darba apraksts

Pielikumi

- Plāksnei

x, cm	U, mV	f, Hz	$B_{x,eff}, T$	Ω	$j_{1A}, A/m$
-15	0.5	300	1.84E-05	3.266	42.4
-14	0.6		2.21E-05		50.9
-13	0.7		2.57E-05		59.4
-12	0.9		3.31E-05		76.3
-11	1.1		4.04E-05		93.3
-10	1.4		5.15E-05		118.7
-9	1.6		5.88E-05		135.7
-8	1.8		6.62E-05		152.7
-7	1.8		6.62E-05		152.7
-6	1.7		6.25E-05		144.2
-5	1.4		5.15E-05		118.7
-4	1.1		4.04E-05		93.3
-3	0.8		2.94E-05		67.8
-2	0.5		1.84E-05		42.4
-1	0.3		1.10E-05		25.4
0	0		0.00E+00		0.0
1	0.2		7.35E-06		17.0
2	0.5		1.84E-05		42.4
3	0.7		2.57E-05		59.4
4	1.1		4.04E-05		93.3
5	1.3		4.78E-05		110.3
6	1.6		5.88E-05		135.7
7	1.8		6.62E-05		152.7
8	1.8		6.62E-05		152.7
9	1.6		5.88E-05		135.7
10	1.4		5.15E-05		118.7
11	1.1		4.04E-05		93.3
12	0.9		3.31E-05		76.3
13	0.7		2.57E-05		59.4
14	0.6		2.21E-05		50.9
15	0.5		1.84E-05		42.4

x ,cm	U , mV	f, Hz	B _{x,eff} , T	Ω	j _{1A} , A/m
-15	0.7	500	1.54E-05	5.444	33.2
-14	0.9		1.99E-05		42.7
-13	1.1		2.43E-05		52.2
-12	1.5		3.31E-05		71.2
-11	1.9		4.19E-05		90.2
-10	2.4		5.29E-05		113.9
-9	3		6.62E-05		142.3
-8	3.4		7.5E-05		161.3
-7	3.4		7.5E-05		161.3
-6	3		6.62E-05		142.3
-5	2.5		5.52E-05		118.6
-4	1.8		3.97E-05		85.4
-3	1.3		2.87E-05		61.7
-2	0.8		1.76E-05		38.0
-1	0.4		8.82E-06		19.0
0	0		0		0.0
1	0.4		8.82E-06		19.0
2	0.8		1.76E-05		38.0
3	1.3		2.87E-05		61.7
4	1.8		3.97E-05		85.4
5	2.5		5.52E-05		118.6
6	3		6.62E-05		142.3
7	3.4		7.50E-05		161.3
8	3.4		7.50E-05		161.3
9	3		6.62E-05		142.3
10	2.5		5.52E-05		118.6
11	1.9		4.19E-05		90.2
12	1.5		3.31E-05		71.2
13	1.1		2.43E-05		52.2
14	0.9		1.99E-05		42.7
15	0.7		1.54E-05		33.2

x ,cm	U , mV	f, Hz	B _{z,eff} , T	Ω	j _{1A} , A/m
-15	1.5	1200	1.38E-05	13.065	21.9
-14	2		1.84E-05		29.3
-13	2.5		2.3E-05		36.6
-12	3		2.76E-05		43.9
-11	4		3.68E-05		58.5
-10	5.5		5.06E-05		80.5
-9	6.5		5.97E-05		95.1
-8	7.5		6.89E-05		109.7
-7	8		7.35E-05		117.0
-6	7		6.43E-05		102.4
-5	5.5		5.06E-05		80.5
-4	4		3.68E-05		58.5
-3	3		2.76E-05		43.9
-2	2		1.84E-05		29.3
-1	1		9.19E-06		14.6
0	0		0		0.0
1	1		9.19E-06		14.6
2	2		1.84E-05		29.3
3	3		2.76E-05		43.9
4	4		3.68E-05		58.5
5	5.5		5.06E-05		80.5
6	7		6.43E-05		102.4
7	8		7.35E-05		117.0
8	7.5		6.89E-05		109.7
9	6.5		5.97E-05		95.1
10	5.5		5.06E-05		80.5
11	4		3.68E-05		58.5
12	3		2.76E-05		43.9
13	2.5		2.30E-05		36.6
14	2		1.84E-05		29.3
15	1.5		1.38E-05		21.9

- Folijai

x	U, mV	f, kHz	$B_{x,eff}$, T	Ω	j_{1A} , A/m
-15	3.5	10	3.86E-06	0.544	36.1
-14	4		4.41E-06		41.3
-13	5		5.52E-06		51.6
-12	6		6.62E-06		62.0
-11	7		7.72E-06		72.3
-10	8		8.82E-06		82.6
-9	9		9.93E-06		92.9
-8	9.5		1.05E-05		98.1
-7	9.5		1.05E-05		98.1
-6	8.5		9.38E-06		87.8
-5	7.5		8.27E-06		77.5
-4	6		6.62E-06		62.0
-3	4.5		4.96E-06		46.5
-2	3		3.31E-06		31.0
-1	1.5		1.65E-06		15.5
0	0		0.00E+00		0.0
1	1.5		1.65E-06		15.5
2	3		3.31E-06		31.0
3	4.5		4.96E-06		46.5
4	6		6.62E-06		62.0
5	7		7.72E-06		72.3
6	8.5		9.38E-06		87.8
7	9.5		1.05E-05		98.1
8	9.5		1.05E-05		98.1
9	9		9.93E-06		92.9
10	7.5		8.27E-06		77.5
11	7		7.72E-06		72.3
12	6		6.62E-06		62.0
13	5		5.52E-06		51.6
14	4		4.41E-06		41.3
15	3.5		3.86E-06		36.1

x	U , mV	f, kHz	B _{x;eff} , T	Ω	j _{1A} , A/m
-15	4.5	20	2.48E-06	1.089	30.4
-14	5.5		3.03E-06		37.1
-13	6.5		3.58E-06		43.9
-12	8.5		4.69E-06		57.4
-11	10		5.52E-06		67.5
-10	12.5		6.89E-06		84.4
-9	14.5		8.00E-06		97.9
-8	16		8.82E-06		108.0
-7	16		8.82E-06		108.0
-6	14.5		8.00E-06		97.9
-5	12		6.62E-06		81.0
-4	9.5		5.24E-06		64.1
-3	7		3.86E-06		47.3
-2	4.5		2.48E-06		30.4
-1	2.5		1.38E-06		16.9
0	0		0.00E+00		0.0
1	2.5		1.38E-06		16.9
2	4.5		2.48E-06		30.4
3	7		3.86E-06		47.3
4	9.5		5.24E-06		64.1
5	12		6.62E-06		81.0
6	14.5		8.00E-06		97.9
7	16		8.82E-06		108.0
8	16		8.82E-06		108.0
9	14.5		8.00E-06		97.9
10	12.5		6.89E-06		84.4
11	10		5.52E-06		67.5
12	8.5		4.69E-06		57.4
13	6.5		3.58E-06		43.9
14	5.5		3.03E-06		37.1
15	4.5		2.48E-06		30.4

x	U , mV	f, kHz	B _{к,eff} , T	Ω	j _{1A} , A/m
-15	30	100	3.31E-06	5.444	29.3
-14	35		3.86E-06		34.1
-13	45		4.96E-06		43.9
-12	60		6.62E-06		58.5
-11	80		8.82E-06		78.0
-10	105		1.16E-05		102.4
-9	135		1.49E-05		131.7
-8	150		1.65E-05		146.3
-7	155		1.71E-05		151.2
-6	140		1.54E-05		136.5
-5	110		1.21E-05		107.3
-4	85		9.38E-06		82.9
-3	55		6.07E-06		53.6
-2	35		3.86E-06		34.1
-1	25		2.76E-06		24.4
0	0		0.00E+00		0.0
1	25		2.76E-06		24.4
2	35		3.86E-06		34.1
3	55		6.07E-06		53.6
4	85		9.38E-06		82.9
5	110		1.21E-05		107.3
6	140		1.54E-05		136.5
7	155		1.71E-05		151.2
8	150		1.65E-05		146.3
9	135		1.49E-05		131.7
10	105		1.16E-05		102.4
11	80		8.82E-06		78.0
12	60		6.62E-06		58.5
13	45		4.96E-06		43.9
14	35		3.86E-06		34.1
15	30		3.31E-06		29.3