



SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

Leptání plasmou

Ing. Pavel Bouchalík



1. ÚVOD

Tato semestrální práce obsahuje písemné vypracování řešení příkladu **Leptání plasmou**. Jde o praktickou zkoušku znalostí získaných při přednáškách **Plánování experimentu**.

2. ZADÁNÍ ÚLOHY

Byla změřena závislost rychlosti plasmového leptání při výrobě polovodičů (0,1 nm/min) na třech faktorech:

- A) mezera anoda/katoda
- B) tok plynu
- C) napětí na katodě

Pro každou sérii měření byly provedeny dvě opakování. Rychlost leptání byla měřena pro různé kombinace hodnot sledovaných faktorů a každý faktor měl dvě úrovně označené **1** horní mez a **-1** dolní mez. Výsledky faktorového pokusu jsou uvedeny v následující tabulce:

tabulka 1: Zdrojová data

A	B	C	e1	e2
-1	-1	-1	247	400
1	-1	-1	470	446
-1	1	-1	429	405
1	1	-1	435	445
-1	-1	1	837	850
1	-1	1	551	670
-1	1	1	775	865
1	1	1	660	530

Vysvětlivky:

A, B, C – úrovně faktorů

e1, e2 – rychlost leptání

3. ŘEŠENÍ ÚLOHY

3.1 Výpočet efektů a interakcí

Výše uvedený příklad je možné řešit dvěma způsoby. První způsob řešení je založen na zprůměrování výsledků měření rychlosti leptání. Vstupní data výpočtu jsou uvedeny v následující tabulce:

tabulka 2: Vstupní údaje výpočtu – první způsob výpočtu

A	B	C	Interakce			e1	e2	průměr
			AB	BC	AC			
-1	-1	-1	1	1	1	247	400	323,5
1	-1	-1	-1	1	-1	470	446	458
-1	1	-1	-1	-1	1	429	405	417
1	1	-1	1	-1	-1	435	445	440
-1	-1	1	1	-1	-1	837	850	843,5
1	-1	1	-1	-1	1	551	670	610,5
-1	1	1	-1	1	-1	775	865	820
1	1	1	1	1	1	660	530	595

Vlastní výpočet efektů a interakcí provedeme prostým vynásobením hodnot ve sloupečku průměr v tabulce č.2 odpovídajícími hodnotami ve sloupcích A, B, C, AB, BC, AC. Příslušné hodnoty efektů a interakcí pro jednotlivé faktory pak vypočteme sečtením hodnot v jednotlivých sloupcích a zprůměrováním součtů, to je v tomto případě jejich vydělením osmi. Mezivýsledky a vypočtené hodnoty efektů a interakcí jsou uvedeny v tabulce č.3. Vlastní výpočet byl proveden v programu MS OFFICE EXCEL 2003.

tabulka 3: Výpočet efektů a interakcí – první způsob výpočtu

Efekty			Interakce		
A	B	C	AB	BC	AC
-323,5	-323,5	-323,5	323,5	323,5	323,5
458	-458	-458	-458	458	-458
-417	417	-417	-417	-417	417
440	440	-440	440	-440	-440
-843,5	-843,5	843,5	843,5	-843,5	-843,5
610,5	-610,5	610,5	-610,5	-610,5	610,5
-820	820	820	-820	820	-820
595	595	595	595	595	595

-37,5625 4,5625 153,8125 -12,9375 -14,3125 -76,9375
EA EB EC IAB IBC IAC

Vysvětlivky:

- EA efekt faktoru A
- EB efekt faktoru B
- EC efekt faktoru C
- IAB interakce faktorů AB
- IBC interakce faktorů BC
- IAC interakce faktorů AC

K tomuto výpočtu je možné použít lineární regresi, která je k dispozici např. v programu MS OFFICE EXCEL v doplňku Analýza dat pod označením Regrese. Výstup výpočtu vypadá následovně (faktory a interakce – nezávisle proměnné, Y – průměry rychlostí leptání):

VÝSLEDEK

<i>Regresní statistika</i>	
Násobné R	0,99646376
Hodnota spolehlivosti R	0,99294003
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,95058018
Chyba stř. hodnoty	42,2496302
Pozorování	8

ANOVA

	<i>Rozdíl</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Významnost F</i>
Regrese	6	251053,1875	41842,2	23,4406	0,15680441
Rezidua	1	1785,03125	1785,03		
Celkem	7	252838,2188			

	<i>Koeficienty</i>	<i>Chyba stř. hodnoty</i>	<i>t stat</i>	<i>Hodnota P</i>
Hranice	563,4375	14,9375	37,7197	0,016874
Soubor A	-37,5625	14,9375	-2,5146	0,240958
Soubor B	4,5625	14,9375	0,30544	0,811281
Soubor C	153,8125	14,9375	10,2971	0,061632
Soubor AB	-12,9375	14,9375	-0,8661	0,545599
Soubor BC	-14,3125	14,9375	-0,9582	0,513601
Soubor AC	-76,9375	14,9375	-5,1506	0,122082

Druhý způsob výpočtu je založen na uspořádání vstupních dat uvedeném v tabulce č.4.

tabulka 4: vstupní data – druhý způsob výpočtu

A	B	C	Interakce			e
			AB	BC	AC	
-1	-1	-1	1	1	1	247
1	-1	-1	-1	1	-1	470
-1	1	-1	-1	-1	1	429
1	1	-1	1	-1	-1	435
-1	-1	1	1	-1	-1	837
1	-1	1	-1	-1	1	551
-1	1	1	-1	1	-1	775
1	1	1	1	1	1	660
-1	-1	-1	1	1	1	400
1	-1	-1	-1	1	-1	446
-1	1	-1	-1	-1	1	405
1	1	-1	1	-1	-1	445
-1	-1	1	1	-1	-1	850
1	-1	1	-1	-1	1	670
-1	1	1	-1	1	-1	865
1	1	1	1	1	1	530

tabulka 5: Výpočet efektů a interakcí – druhý způsob výpočtu

Efekty			Interakce		
A	B	C	AB	BC	AC
-247	-247	-247	247	247	247
470	-470	-470	-470	470	-470
-429	429	-429	-429	-429	429
435	435	-435	435	-435	-435
-837	-837	837	837	-837	-837
551	-551	551	-551	-551	551
-775	775	775	-775	775	-775
660	660	660	660	660	660
-400	-400	-400	400	400	400
446	-446	-446	-446	446	-446
-405	405	-405	-405	-405	405
445	445	-445	445	-445	-445
-850	-850	850	850	-850	-850
670	-670	670	-670	-670	670
-865	865	865	-865	865	-865
530	530	530	530	530	530
-37,5625	4,5625	153,8125	-12,9375	-14,3125	-76,9375
EA	EB	EC	IAB	IBC	IAC

Z hodnot interakcí a efektů uvedených v tabulce č.5 je patrné, že jsme dospěli, ke stejným výsledkům. Analogicky jako v předchozím případě můžeme použít regresi z EXCELU.

VÝSLEDEK

<i>Regresní statistika</i>	
Násobné R	0,966361
Hodnota spolehlivosti R	0,933853
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,889754
Chyba stř. hodnoty	62,86278
Pozorování	16

ANOVA								
		<i>Rozdíl</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Významnost F</i>		
Regrese		6	502106,4	83684,4	21,17665	7,87538E-05		
Rezidua		9	35565,56	3951,729				
Celkem		15	537671,9					

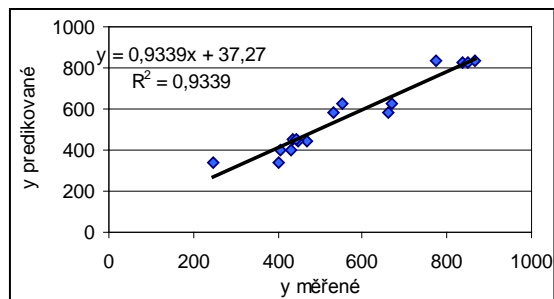
	<i>Koeficienty</i>	<i>Chyba stř. hodnoty</i>	<i>t stat</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>Dolní 95%</i>	<i>Horní 95%</i>	<i>Dolní 95,0%</i>	<i>Horní 95,0%</i>
Hranice	563,4375	15,7157	35,8519	5,06E-11	527,8861	598,9889	527,8861	598,9889
Soubor A	-37,5625	15,7157	-2,39013	0,040549	-73,1139	-2,01113	-73,1139	-2,01113
Soubor B	4,5625	15,7157	0,290315	0,778154	-30,9889	40,11387	-30,9889	40,11387
Soubor C	153,8125	15,7157	9,78719	4,28E-06	118,2611	189,3639	118,2611	189,3639
Soubor AB	-12,9375	15,7157	-0,82322	0,431654	-48,4889	22,61387	-48,4889	22,61387
Soubor BC	-14,3125	15,7157	-0,91071	0,386188	-49,8639	21,23887	-49,8639	21,23887
Soubor AC	-76,9375	15,7157	-4,89558	0,000853	-112,489	-41,3861	-112,489	-41,3861

Ze získaného výstupu je patrné, že získaný regresní model má koeficient determinace 0,934. Hodnoty t statistiky a pravděpodobnosti P určují faktory A, C a interakci AC jako statisticky významné ($\alpha = 0,05$).

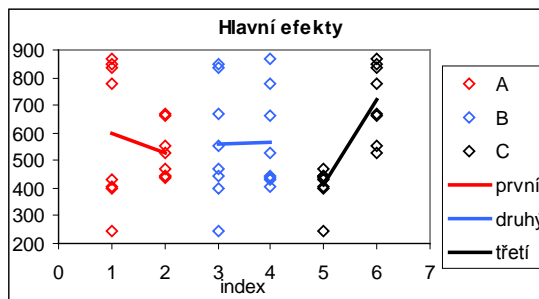
3.2 Grafická analýza významnosti efektů a interakcí

To, že faktory A, C a také interakce faktorů AC jsou významné (mají vliv na zkoumaný model) bylo určeno testováním významnosti jednotlivých regresních konstant v předchozí kapitole. K témuž můžeme použít i některé grafické diagnostiky viz. níže uvedené.

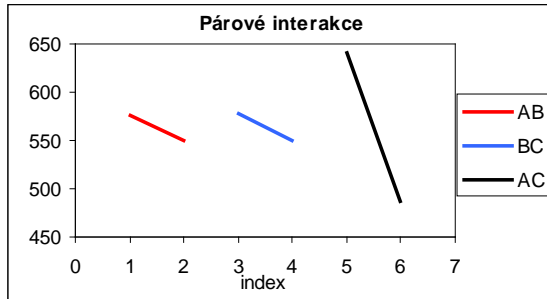
obr. 1: Regresní model



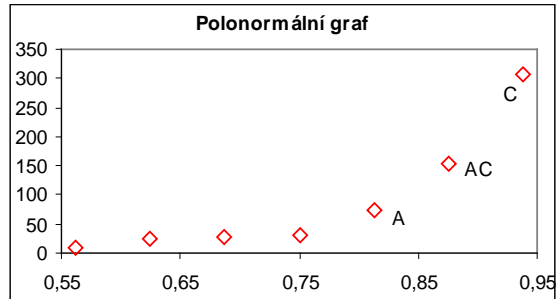
obr. 2: Hlavní efekty



obr. 3: Párové interakce



obr. 4: Polonormální graf



Z grafu Hlavních efektů obr. 2 je patrné, že nejvýznamnější je vliv efektu C a také jako významný se jeví i efekt A, efekt B je nevýznamný. Z grafu párových interakcí obr. 3 je zřejmé, že interakce AC je významná a interakce AB a AC jsou nevýznamné a přibližně stejné. To je v souladu s grafickou diagnostikou Polonormální graf obr. 4 body A, AC a C jsou odlehle od ostatních.

3.3 Anova test

Test významnosti jednotlivých faktorů a interakcí můžeme provést rovněž pomocí ANOVY. Výsledky analýzy rozptylu efektů a interakcí jsou uvedeny v následující tabulce:

tabulka 6: Anova

FAKTOR	volnost	SS	MS	F test.	Závěr testu
A	1	22575	22575,0625	5,644559391	Významný
B	1	333	333,0625	0,083277336	Nevýznamný
C	1	378533	378532,5625	94,64645028	Významný
AB	1	2678	2678,0625	0,669609789	Nevýznamný
BC	1	3278	3277,5625	0,819505868	Nevýznamný
AC	1	94710	94710,0625	23,68084574	Významný
ABC	1	3570	3570,0625	0,892641153	Nevýznamný
Chyba	8	31996	3999,4375		
Celkem	15	537672			

Hodnota kritického kvantitu F rozdělení: 4,54308

Vysvětlivky:

$$\text{Celkem} = \sum_{i=1, k=1}^{N, 2} (y_{i,k} - \mu_c)^2$$

kde μ_c je celkový průměr absolutních hodnot dolních a horních úrovní.

Ostatní hodnoty $SS = \text{Celkem} - \text{součet čtverců odchylek sloupců dolních a horních úrovní od sloupcových průměrů}$.

Chyba je rozdíl mezi Celkem a sumou hodnot SS faktorů a interakcí

F test. je hodnota testovacího kritéria a jde o poměr MS (SS/volnost) a Chyba

F rozdělení spočteno v Excelu pomocí funkce FINV (0,05; 1; 15)

U faktorů A, C a interakce AC jsou hodnoty testovacího kritéria F test. větší než hodnoty kritického kvantitu F rozdělení – jde tedy o významné hodnoty (zamítáme primární hypotézu H_0 o jejich nevýznamnosti na hladině významnosti α 0,05). To je v souladu se závěry z regrese a grafických diagnostik.

4. ZÁVĚR

Na rychlost plazmového leptání mají tedy vliv tyto faktory:

- mezera anoda/katoda (negativní vliv)
- napětí na katodě (pozitivní vliv)

Jako další z interakcí mezi faktory vyplývá, že velikost napětí na elektrodách závisí na vzdálenosti anoda/katoda.