



**Fakulta chemicko technologická
Katedra analytické chemie
licenční studium Management systému jakosti**

Plánování experimentu

Autor: Ing. Radek Růčka

Přednášející: Prof. Ing. Jiří Militký, CSc.

1. LEPTÁNÍ PLAZMOU

1.1 Zadání

Proces výroby polovodičů pomocí plazmovým leptáním (rychlost leptání 0,1nm/min) je ovlivňován třemi faktory:

"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.

1.2 Data

Tabulka 1.1 Naměřená 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

Program: MS Office Excel 2003, mj. modul analýza dat

Název souboru s daty a výpočtem: PE_pracovni.xls

1.3 Vyhodnocení

1.3.1 Výpočet efektů a interakcí

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

Tabulka 1.2 Vstupní data pro první způsob výpočtu

Faktory			Interakce			Rychlost leptání		
A	B	C	AB	BC	AC	e1	e2	průměr
-1	-1	-1	1	1	1	247	400	324
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	844
1	-1	1	-1	-1	1	551	670	611
-1	1	1	-1	1	-1	775	865	820
1	1	1	1	1	1	660	530	595

Výpočet efektů a interakcí se provede vynásobením hodnot ve sloupci průměr (tab. 1.2) odpovídajícími hodnotami sloupcích A, B, C, AB, BC, AC.

Příslušné hodnoty efektů a interakcí pro jednotlivé faktory jsou průměrnou hodnotou výše uvedených operací násobení. Výsledek výpočtu je uveden v tabulce 1.3.

Tabulka 1.3 Vstupní data pro první způsob výpočtu

Faktory			Interakce		
A	B	C	AB	BC	AC
-323,50	-323,50	-323,50	323,50	323,50	323,50
458,00	-458,00	-458,00	-458,00	458,00	-458,00
-417,00	417,00	-417,00	-417,00	-417,00	417,00
440,00	440,00	-440,00	440,00	-440,00	-440,00
-843,50	-843,50	843,50	843,50	-843,50	-843,50
610,50	-610,50	610,50	-610,50	-610,50	610,50
-820,00	820,00	820,00	-820,00	820,00	-820,00
595,00	595,00	595,00	595,00	595,00	595,00

EA	EB	EC	IAB	IBC	IAC
-37,56	4,56	153,81	-12,94	-14,31	-76,94

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

Výpočet je možné provést i pomocí MS Office Excell lineární regresí, kde vstupem jsou faktory a interakce (nezávisle proměnná) a průměrné hodnoty rychlosti leptání (závisle proměnná).

Tabulka 1.4 Regresní statistika

Násobné R	0,996463761
Hodnota spolehlivosti R	0,992940026
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,950580182
Chyba stř. hodnoty	42,24963018
Pozorování	8

Tabulka 1.5 Anova

	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F
Regrese	6	251053,188	41842,198	23,441	0,1568044
Rezidua	1	1785,031	1785,031		
Celkem	7	252838,219			

	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t stat	Hodnota P
Hranice	563,438	14,938	37,720	0,017
Soubor A	-37,563	14,938	-2,515	0,241
Soubor B	4,562	14,938	0,305	0,811
Soubor C	153,813	14,938	10,297	0,062
Soubor AB	-12,938	14,938	-0,866	0,546
Soubor BC	-14,313	14,938	-0,958	0,514
Soubor AC	-76,938	14,938	-5,151	0,122

Druhý způsob výpočtu je založen na uspořádání vstupních dat uvedených v tabulce 1.4.

Tabulka 1.6 Vstupní data pro druhý způsob výpočtu

Faktory			Interakce			e
A	B	C	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 1.7 Výpočet efektů a interakcí- druhý způsob výpočtu

Faktory			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

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

Z výsledků vyplývá, že oba způsoby výpočtu vedou ke stejným výsledkům. Obdobně jako v předchozím případě můžeme použít lineární regresi výpočtem v MS Excel.

Tabulka 1.8 Regresní statistika

Násobné R	0,966361
Hodnota spolehlivosti R	0,933853
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,889754
Chyba stř. hodnoty	62,86278
Pozorování	16

Tabulka 1.9 Anova

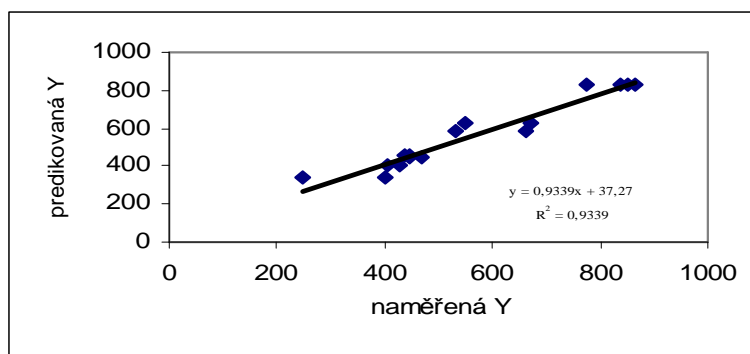
	Rozdíl	SS	MS	F	Významnost F
Regrese	6	502106,375	83684,396	21,177	0,000079
Rezidua	9	35565,563	3951,729		
Celkem	15	537671,938			

	Koeficienty	Chyba stř. hodnoty	t stat	Hodnota P
Hranice	563,4375	15,715695	35,8519	5,06E-11
Soubor A	-37,5625	15,715695	-2,390127	0,040549
Soubor B	4,5625	15,715695	0,290315	0,778154
Soubor C	153,8125	15,715695	9,78719	4,28E-06
Soubor AB	-12,9375	15,715695	-0,823222	0,431654
Soubor BC	-14,3125	15,715695	-0,910714	0,386188
Soubor AC	-76,9375	15,715695	-4,895584	0,000853

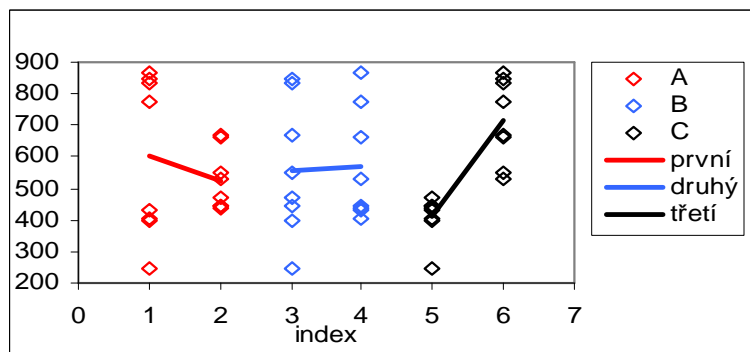
Z výsledků vyplývá, že získaný regresní model má koeficient determinace 0,934. Hodnoty t statistiky a pravděpodobnosti P určují faktory A, C a interakci AC jako statisticky významné ($\alpha=1$).

1.3.2 Výpočet efektů a interakcí

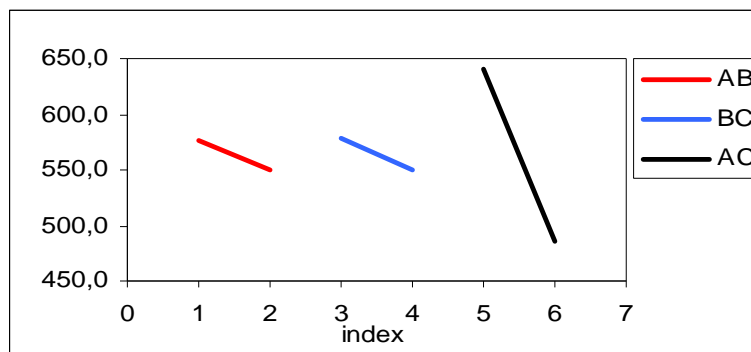
Ke zjištění významnosti jednotlivých faktorů A, B, C a jejich interakcí lze použít i některých grafických diagnostik.



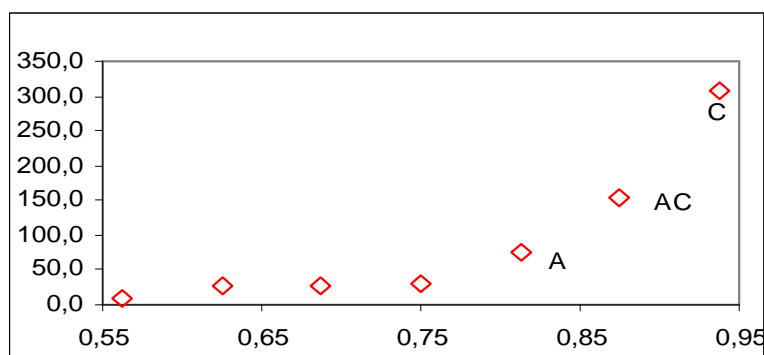
Obr. 1.1 Regresní model



Obr. 1.2 Hlavní efekty



Obr. 1.3 Párové interakce



Obr. 1.4 Polonormální graf

Z grafu Hlavních efektů (obr. 1.2) 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. 1.3) 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. 1.4), kde body A, AC a C jsou odlehle od ostatních.

1.3.3 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 1.10 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 kvantilu F rozdělení: 4,54308

vysvětlivky

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

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

Ostatní hodnoty SS = Celkem – 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 kvantilu F rozdělení, jde tedy o významné hodnoty (zamítáme primární hypotézu H_0 o jejich nevýznamnosti na hladině významnosti $\alpha=0,05$). To je v souladu se závěry z regrese a grafických diagnostik.

1.4 Souhrn a závěr

Na rychlost plazmového leptání mají vliv tyto faktory:

§ mezeza 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.