

מרתון בפיסיקה של מל"מ

רון בנימין

נובמבר 2025

זכויות יוצרים

פיסיקה של מל"מ

כל הזכויות שמורות.

חוברת זו נכתבה ונערכה במיוחד עבור סטודנטים הלומדים את הקורס **פיסיקה של מל"מ** באוניברסיטת בן גוריון בנגב. המרתון נועד לסייע בהבנת החומר הנלמד בקורס, וכולל סיכומים, הסברים תמציתיים, דוגמאות, תרגילים פתורים, וידע שנאסף ממגוון מקורות – לרבות הרצאות, תרגולים, ומסמכים רשמיים של הקורס.

אין להעתיק, לשכפל, להפיץ, לתרגם, להציג בפומבי, או לעשות כל שימוש מסחרי בתכני החוברת, כולם או חלקם, ללא קבלת רשות מפורשת מראש ובכתב מהיוצר.

השימוש בחוברת מותר לסטודנטים לצורכי לימוד אישי בלבד. הכותב אינו אחראי לשגיאות, אי-דיוקים או לתוצאות הנובעות משימוש במידע המופיע בה.

נכתב וערוך על ידי:

רון בנימין

אוניברסיטת בן גוריון בנגב

גרסה אחרונה: נובמבר 2025

תוכן העניינים

8	1 מבוא לקבל MOS
8	1.1 השוואה בין קבל רגיל לקבל MOS
8	1.2 הבדלים מרכזיים בקבל MOS
8	2 המבודד (תחמוצת)
8	2.1 יתרונות התחמוצת על פני אוויר
9	2.2 תחמוצות מתקדמות
9	2.3 ייצור תחמוצת סיליקון
9	2.4 תהליך החימצון
9	2.5 בעיות בתהליך החימצון
10	3 הלוח המתכתי (השער)
10	3.1 שימוש באלומיניום
11	3.2 פתרונות לבעיות השער המתכתי
11	4 מושגי קיבול ויחידות
11	4.1 הגדרת קיבול
12	4.2 קיבול ליחידת שטח
12	4.2.1 דוגמה חישובית
12	5 התנהגות קבל MOS - אלקטרוסטטיקה ומבנה פסים
13	5.1 דיאגרמת הפסים ופונקציית העבודה
14	5.2 קבל MOS אידאלי ומצב יישור פסים
14	6 מצבי פעולה של קבל MOS
14	6.1 מצב צבירה (Accumulation)
15	6.2 מצב מיחסור (Depletion)
16	6.3 מצב היפוך (Inversion)
16	6.3.1 מתח הסף (V_T - Threshold Voltage)
16	7 פתרון משוואת פואסון במל"מ
16	7.1 הנחות היסוד לפתרון
17	7.2 משוואת פואסון וכיפוף הפסים
17	7.3 אינטגרציה וקבלת השדה החשמלי
17	8 מטען, קיבול ומתח שער
17	8.1 צפיפות המטען המרחבי
18	8.2 חישוב מתח השער
18	8.3 קיבול במצב יישור פסים (Flat Band Capacitance)
19	8.4 פתרון נומרי ותוצאות
19	8.5 מאפייני הקיבול וריכוז המטענים
19	8.6 משמעות המיחסור
20	8.7 קירוב המיחסור - הפתרון האנליטי
20	8.8 הנחות הקירוב
21	8.9 פתרון המשוואות
21	8.10 פתרון משוואת פואסון וחישוב מתח הסף

21	חשוב רוחב המיחסור ומתח התחמוצת	8.11
21	חשוב מתח הסף (V_T)	8.12
22	סיכום מצבי קבל MOS	8.13
22	9 תגובת תדר ומדידות C-V	
22	תדר נמוך מול תדר גבוה	9.1
23	הפקת מידע ממדידות C-V	9.2
23	10 קבל MOS לא אידאלי	
23	מטענים בתחמוצת	10.1
24	הפרש פונקציות עבודה (Φ_{MS})	10.2
25	הפרשי פונקציית עבודה ומתח יישור פסים מעשי	10.3
26	סיכום כללי של קבל MOS	10.4
26	תרגיל מסכם: חישוב פרמטרים בקבל MOS	10.5
28	תרגיל המשך: חישובי קיבול	10.6
29	תרגיל: שינוי עובי התחמוצת	10.7
29	11 השפעת מטענים בתחמוצת	
30	מקרה א': מטען משטחי בממשק ($x = t_{ox}$)	11.1
30	מקרה ב': מטען באמצע התחמוצת ($x = t_{ox}/2$)	11.2
30	12 טרנזיסטור MOSFET - מבנה ועקרונות פעולה	
30	מבנה וסוגים	12.1
31	מצבי פעולה בסיסיים	12.2
31	13 אפקט הגוף (Body Effect)	
31	השפעה פיזיקלית	13.1
31	נוסחת אפקט הגוף	13.2
32	14 בניית מודל זרם-מתח (I-V)	
32	הנחות המודל	14.1
33	בניית התשתית לחישוב זרם-מתח (IV) בטרנזיסטור	14.2
33	הגדרות בסיסיות ומערכת צירים	14.2.1
33	הנחות יסוד לפיתוח	14.2.2
34	משוואת הזרם האינטגרלית	14.2.3
34	15 המודל הריבועי (Square Law Model)	
34	הנחות המודל הריבועי	15.1
34	חישוב הזרם בתחום הלינארי	15.2
34	מצב רוויה (Saturation)	15.3
35	אפקט קיצור התעלה (Channel Length Modulation)	15.4
35	16 מודל מטען הגוף (Body Charge Model)	
35	הנחות ותיקון למטען	16.1
36	חישוב הזרם ומתח הרוויה במודל מטען הגוף	16.2
36	דוגמה מספרית: חישוב זרם במודל מטען הגוף	16.3

37	17 רווית מהירות ומודל תעלה קצרה
37	17.1 השפעת רווית המהירות על המוביליות
38	17.2 חישוב מתח הרוויה תחת רווית מהירות
38	17.3 סיכום ביניים של מודלי MOSFET
39	18 הולכה בתחום התת-סיפי (Sub-threshold)
39	18.1 פיתוח המודל הפיסיקאלי
39	18.2 משוואת הזרם התת-סיפי
40	18.3 הגדרות ופרמטרים חשובים בתחום התת-סיפי
40	18.3.1 הגדרה חדשה למתח הסף (V_T)
40	18.3.2 Swing Sub-threshold (S)
41	18.3.3 זרם זליגה (I_{off})
41	18.4 שיקולי הספק ויישומים
41	19 אפקטי תעלה קצרה: מודל שיתוף המטען (Charge Sharing)
42	19.1 המודל הגיאומטרי (המעבר למודל טרפז)
42	19.2 שינוי במבנה הפסים
43	19.3 חישוב ירידת מתח הסף
43	20 אפקטי רוחב צר (Narrow Width Effects)
43	20.1 קיבול קצה (Fringing Fields)
43	20.2 השפעה על מתח הסף
45	20.3 הורדת מחסום מושרית שפך (DIBL - Drain Induced Barrier Lowering)
45	21 שאלות
45	21.1 שאלה 1
48	21.2 שאלה 2
50	21.3 שאלה 3
51	21.4 המודל המאוחד (Unified Model)
51	21.5 פיתוח מודל רווית המהירות (Velocity Saturation)
52	21.6 חישוב זרמי הרוויה הפוטנציאליים
52	22 פתרונות טכנולוגיים מתקדמים
52	22.1 סיליקון על מבודד (SOI - Silicon On Insulator)
53	22.2 ריבוי שערים (Multi-Gate / FinFET)
53	22.3 ננו-חוטים (Nanowires / Gate-All-Around)
54	23 מבוא להתקנים אופטואלקטרוניים
54	23.1 משוואות היסוד
55	23.2 משוואות הרציפות (Continuity Equations)
55	24 פוטונים, פונונים ומבנה פסים
55	24.1 הפוטון (Photon)
55	24.2 הפונון (Phonon)
56	24.3 מבנה פסים: ישיר מול לא-ישיר
56	25 מנגנוני מעבר אנרגיה: פוטונים ופונונים

57	26 סוגי יצירה ושיחבור (Generation & Recombination)
58	26.1 1. שיחבור פסים ישיר (Band-to-Band Recombination)
58	26.2 2. שיחבור דרך מלכודות (Trap-Assisted / SRH)
58	26.3 3. שיחבור אוז'ה (Auger Recombination)
59	26.4 התייחסות סטטיסטית וקצבי יצירה
59	27 פיתוח מתמטי של רקומבינציה ישירה
59	27.1 הגדרת עודף נושאי המטען
59	27.2 קצב הרקומבינציה נטו
59	27.3 קירוב הזרקה נמוכה וזמן חיים
60	28 אינטראקציה של אור עם חומר: הספקים ובליעה
60	28.1 חוק ביר-למברט (Beer-Lambert)
60	29 הפוטו-מוליך (Photoconductor)
61	29.1 עקרון הפעולה
61	29.2 חישוב הזרם האופטי
61	29.3 תגובתיות (Responsivity)
62	29.4 תגובה בזמן ובמרחב
62	29.4.1 תגובה בזמן (Time Dependence)
62	29.4.2 תלות במרחב (Spatial Dependence)
62	30 מגלגלי פוטו-מוליך לגלאי צומת (פוטודיודה)
63	30.1 המוטיבציה לשימוש בדיודה
63	31 הפיסיקה של הדיודה תחת הארה
63	31.1 זרם סחיפה מול זרם דיפוזיה
64	31.2 חשיבות הממתח האחורי
64	31.3 מבנה ה- $n-i-p$: הפתרון האופטימלי
65	31.4 פיתוח משוואות הזרם
65	31.5 זרם הסחיפה (באזור המיחסור)
65	31.6 זרם הדיפוזיה (באזור הנייטרלי)
65	31.7 תגובתיות וזמני תגובה
66	31.8 תגובתיות (Responsivity)
66	31.9 זמני תגובה (Response Time)
67	32 זמני תגובה בגלאים
67	32.1 1. זמן קיבולי (τ_{RC})
67	32.2 2. זמן חציה (Transit Time - τ_{tr})
67	32.3 אופטימיזציה (זמן תגובה אופטימלי)
67	32.4 דוגמה לחישוב אופטימיזציה
68	32.5 השוואה: צומת רגיל מול PIN
71	33 מפוטודיודה לתא שמש
71	33.1 רביע הפעולה
72	33.2 משוואת הזרם והמעגל השקול
72	33.3 פרמטרים עיקריים של תא שמש