

תוכן עניינים :

1	תקציר
3	רשימת סמלים וקיצורים
4	פרק 1 - מבוא
4	1.1 תיאור כללי של טכנולוגיית MEMS
5	1.2 סקר ספרות
5	1.2.1 רכיבים מבוססי MEMS לתדר גבוה – סקירה כללית
6	1.2.2 מתגים מבוססי MEMS לתדר גבוה
8	1.2.3 עקרונות פיזיקליים
9	1.2.4 סיווג מתגים מבוססי RF-MEMS
14	1.2.5 ניתוח אנליטי של מתג מקבילי, קיבולי אופייני (Shunt Capacitive Switch)
14	1.2.5.1 מבנה גיאומטרי ומאפייני חומרים :
16	1.2.5.2 מיתוג תדר גבוה – מודל מקובץ :
19	1.2.5.3 המאפיינים המכניים וההפעלה אלקטרוסטטית :
22	1.2.6 טכנולוגיות מימוש
22	1.2.6.1 מימוש בטכנולוגיית שכבות דקות (Thin Film) :
24	1.2.6.2 מימוש בטכנולוגיית היברידית - שימוש בהשמה מדויקת בתהליך Flip Chip Bonding
26	1.2.7 מנגנוני כשל ואמינות מתגים
28	1.2.8 זיווד ואריזה
29	פרק 2 - מטרות המחקר
30	פרק 3 – תיאור העבודה
32	3.1 בחירת ארכיטקטורת רכיב
34	3.2 קו התמסורת הקו-פלנרי (CPW)
34	3.2.1 חישוב פרמטרי הקו ותכן גיאומטרי
40	3.2.2 מימוש קו התמסורת
42	3.3 עקרונות המבנה של המתג ההיברידי
44	3.4 תכן המתג ההיברידי
44	3.4.1 תכן המבנה הגיאומטרי
45	3.4.1.1 חישוב קבוע קפיץ
47	3.4.1.2 חישוב מתח סף להפעלה
48	3.4.1.3 תכן מסגרת התמיכה לרכיב
49	3.4.2 תכן המבנה לתדר גבוה
49	3.4.2.1 מודל חשמלי מקובץ
51	3.4.2.2 חישוב פרמטרים אופייניים במצב Off
52	3.4.2.3 חישוב פרמטרים אופייניים במצב On
52	3.4.2.4 איכות הדיאלקטריקן והתופעות הנלוות אליו
53	3.4.2.5 מבנה המתג הקיבולי והמתג האוהמי
54	3.5 תכן וביצוע תהליך הייצור

54	3.5.1 מבנה המתג הכללי
54	3.5.2 תהליכי מימוש
55	3.5.2.1 מימוש רכיב מיתוג תדר גבוה
57	3.5.2.3 מיקרו עיבוד צד אחורי
57	3.5.2.4 תהליך ניסור ושחרור
59	3.5.3 תהליך ההרכבה
60	3.6 מערכות מדידה
60	3.6.1 מדידה מכנית
61	3.6.2 מדידת תדר גבוה
62	פרק 4 – תוצאות
62	4.1 מדידות מאפייני קו תמסורת
64	4.2 מדידות תכונות אלקטרו-מכאניות
68	4.3 מדידות תדר גבוה
72	פרק 5 – דיון והסקת מסקנות
72	5.1 דיון בישימות עקרון המימוש שנבדק
73	5.2 דיון בתכונות שהתקבלו
74	5.3 המלצות להמשך פיתוח
75	5.4 סיכום
77	רשימת מקורות
I	פתיחה באנגלית

רשימת תרשימים :

8	תרשים 1 – מתג מקבילי/קיבולי, מצב לא פעיל
8	תרשים 2 – מתג מקבילי/קיבולי – מצב פעיל
11	תרשים 3 – חיבור מתג בצורה טורית (Series)
11	תרשים 4 – חיבור מתג בצורה מקבילית (Shunt)
12	תרשים 5 – קו תמסורת מסוג Microstrip
13	תרשים 6 – קו תמסורת מסוג Coplanar Waveguide
14	תרשים 7 – מבנה גיאומטרי אופיני של מתג מקבילי קיבולי
16	תרשים 8 – מודל חשמלי מקובץ למתג קיבולי
17	תרשים 9 – מודל קו תמסורת ומתג מקבילי
19	תרשים 10 – מודל מכני מקובץ של מתג אלקטרוסטטי
23	תרשים 11 – שלבי ייצור מתג בטכנולוגית שכבות דקות
25	תרשים 12 – שלבי ייצור מתג בטכנולוגית FCB
31	תרשים 13 – תהליך גיבוש מבנה מתג
34	תרשים 14 – חתך של קו תמסורת קו-פלנרי
36	תרשים 15 – מימדי קו תמסורת
38	תרשים 16 – הפסד צפוי בקו התמסורת באורך 3 מ"מ
38	תרשים 17 – דגם כיוול למדידת קו תמסורת
39	תרשים 18 – ארכיטקטורת חיבור היברידית
39	תרשים 19 – מסכת שכבת קו תמסורת – שכבת מוליכים.
43	תרשים 20 – מתג היבריד, מצב לא פעיל
43	תרשים 21 – מתג היבריד – מצב פעיל
44	תרשים 22 – מבנה גוף המתג בסיליקון גבישי – (שכבת ההתקן)
45	תרשים 23 – תנועת גוף המתג בעת הפעלת מתח סף
45	תרשים 24 – הגדרת גיאומטריה של קורה רתומה-רתומה.
46	תרשים 25 – חישוב קבוע קפיץ בתכנת אלמנטים סופיים
47	תרשים 26 – שטח אלקטרודות להפעלה אלקטרוסטטית
48	תרשים 27 – פתח המיועד לחישה אופטית בשכבת המצע
49	תרשים 28 – מודל מקובץ של המתג.
53	תרשים 29 – שכבת מתכת (זהב) ודיאלקטריקן (טנטאלום פנטא-אוקסיד) ליצירת המגע קיבולי
54	תרשים 30 – חיבור היבריד
60	תרשים 31 – מערכת מדידה אלקטרו-מכנית
62	תרשים 32 – פרמטרי קו תמסורת ערום
63	תרשים 33 – פרמטרי פיזור של קו תמסורת ערום
64	תרשים 34 – מדידת תדר עצמי רכיב 1a

רשימת תרשימים (המשך):

64	תרשים 35 – זמן מיתוג להפעלה - רכיב 1a
65	תרשים 36 – זמן מיתוג לניתוק - רכיב 1a
65	תרשים 37 – מתח סף להפעלה ושחרור – רכיב 1a
66	תרשים 38 – תדר עצמי בשחרור ובהפעלה – רכיב 2
66	תרשים 39 – זמני מיתוג – רכיב 2
67	תרשים 40 – מתח סף להפעלה ושחרור – רכיב 2
68	תרשים 41 – פרמטרי פיזור – מתג 1 במצב Off
69	תרשים 42 – פרמטרי פיזור – מתג 2 במצב Off
70	תרשים 43 – השוואת מסגרת עם מתג במצב Off למסגרת ללא מתג
71	תרשים 44 – פרמטרי פיזור – מתג במצב On

רשימת תמונות:

7	תמונה 1 – מתג קיבולי (LG)
7	תמונה 2 - מתג קיבולי (Raytheon)
7	תמונה 3 – מתג קיבולי מתח הפעלה נמוך (UoM)
41	תמונה 4 - מדידת עובי שכבות קו התמסורת והמרווח
41	תמונה 5 – שבב קו תמסורת, לפני חיבור מתג
56	תמונה 6 – רכיב המיתוג לתדר גבוה וגוף המתג הסיליקוני לפני שחרור
57	תמונה 7 - מתג לפני שחרור תחמוצת
58	תמונה 8 – מבנה קפיץ וצורת איכול
58	תמונה 9 – מתג כולל
59	תמונה 10 – מיקום מתג לאחר הרכבה

תקציר

חיבור זה מציג פעילות מחקר הכוללת תכן, מימוש ואפיון של מתג מבוסס MEMS למיתוג קווי תמסורת חשמליים לתדרים גבוהים – Radio Frequency (להלן RF). המחקר התבסס על יצירת מתג בעל מבנה ייחודי, תוך התמודדות עם האתגרים העיקריים שהוגדרו במסגרת מימוש רכיבים דומים בעולם.

בכדי להבין את הדרישות וסביבת העבודה של המתג יש להבהיר תחילה מהו התחום הטכנולוגי הנקרא RF-MEMS ומהם סוגי הרכיבים המרכיבים אותו. תחום התדרים המוגדר כתחום ה-RF השתנה רבות עם השנים. בעבר הוגדרו רכיבים שפעלו באזור ה-600 קילו הרץ, בתדרי שידורי הרדיו, כרכיבי RF, כיום מעגלים אלקטרוניים פועלים בתחומי תדר דומים ואף גבוהים יותר בכל מחשב ביתי ואינם קשורים כלל למושג RF – הגדרת תחום תדרים זה "טיפס" מעלה לעבר תדרים בני מספר עשרות גיגה הרץ. הגדרת רכיב כשייך למשפחת רכיבי ה-RF יכולה להסתמך על תכונות שונות מלבד תדר העבודה של הרכיב, למשל גודלו היחסי ביחס לאורך הגל או אפילו על פי האפליקציה (תקשורת אלחוטית לעומת מעבד). משום כך קטגורית הרכיבים אליה שייך המתג הממומש - RF MEMS switches - אינה מדויקת דיה ויש צורך להגדיר במדויק את אופי ותכונות הרכיבים המדוברים.

חיבור זה עוסק במתג המיועד לפעול בתחום תדרי המיקרוגל שבין 26 ל-40 גיגה הרץ, תחום המוגדר כ-Ka Band. תחום תדרים אלו משמש בעיקר ליישומים צבאיים (רדארים) והמערכות האלקטרוניות מבוססות על טכנולוגית ורכיבי MMIC - Microwave Monolithic Integrated Circuit המאפשרים ביצוע פונקציות שונות בתדרים גבוהים אלו. הרכיבים האלקטרוניים המשמשים כיום למיתוג אותות בתדרים אלו – הינם רכיבים מסוג p-i-n diodes or FET. מהירות המיתוג מרשימה אך הבידוד (Isolation) המתקבל אינו גבוה מספיק וההפסדים גבוהים למדי (במיוחד במטריצות מיתוג בעלות מספר כניסות ויציאות). מיתוג של קווי תמסורת בתדרים אלו מבוצע כיום (במערכות הדורשות ביצועי בידוד גבוהים) ע"י מערכות מכאניות מסורבלות התופסות נפח ומשקל רב.

השימוש במתגים מיקרו-מכאניים לתחום ה-RF (RF-MEMS Switches) הודגם לראשונה בשנות ה-90' והתפתח במספר חברות ואוניברסיטאות במהלך העשור האחרון. התוצאות המפורסמות בשנים האחרונות מצביעות על ביצועים טובים בהרבה ביחס למערכות מיתוג המבוססות על טכנולוגית הרכיבים המיקרו אלקטרוניים וכן הודגמו תתי מערכות מקוריות מסוג Phase Shifters בעלות ביצועים מעולים.

בספרות המקצועית מוצגים מתגים שונים המבוססים על רכיב המאפשר שינוי עכבת קו התמסורת במעגל ה-MMIC, הודגמו מתגים על בסיס קווי תמסורת מסוג Micro strip ו-Coplanar Waveguide בצורות שונות ובטכנולוגיות ייצור מיקרומכניות שונות. עקרון המיתוג (משותף לכל המתגים) הינו יצירת קצר או נתק פיזי ע"י סגירת ופתיחת מרווח אוויר בקו התמסורת (בדומה למתגים מכניים רגילים). היתרון במתגים אלו הוא המיזעור והאינטגרציה בתהליכי הייצור של מעגלי התדר הגבוה עצמם. מתגי RF-MEMS נמצאים היום בחזית המחקר בגלל חשיבותם ושימושיהם הפוטנציאליים עבור רשתות מיקרוגל ועבור רכיבים עתידיים בתחום האנטנות, הפילטרים ומסיטי פאזה (Phase Shifters).

במסגרת מחקר זה בוצע סקר ספרות מקיף לגבי ביצועי הרכיבים שמומשו עד כה והשימוש בטכנולוגיות המימוש השונות. על בסיס הסקר, נותחו הבעיות המרכזיות הקשורות לאמינות התכן המקובל ונחקרו דרכי פעולה שונות לשיפורה. רעיונות התכן שנבדקו התבססו על מימוש המתג תוך ניצול טכנולוגיות המיקרו-אלקטרוניקה הקיימות בטכניון וביצוע חיבור בצורה היברידית ע"י שימוש ב-Flip Chip Bonding.

בשלב השני במחקר נבחנו רעיונות התכן ע"י ביצוע סימולציות בתחומים פיסיקליים שונים :

א. סימולציות מכניות ואלקטרו-מכניות של מבנה המתג המוצע.

ב. סימולציות תדר גבוה לבחינת קווי התמסורת שתוכננו ולשם חיזוי ביצועי המתג.

השלב השלישי כלל :

א. תכנון תהליך המימוש בהתבסס על יכולות זמינות בטכניון (הן בייצור והן במדידת התכונות המכניות)

ב. מימוש קווי התמסורת והרכיבים.

ג. חיבור היברידי וזיווד חשמלי של הרכיבים.

השלב הרביעי , שלב המדידות כלל התאמה של מערכת האפיון בפקולטה להנדסת מכונות וביצוע אפיון פרמטרים מכניים ואלקטרו-מכניים. כמו כן נעשה שימוש ביכולות המדידה בתדר גבוה של קבוצת תר"ש מיקרואלקטרוניקה ברפא"ל, לקבלת מעטפת הביצועים של המתג והשוואתו לתכן ולסימולציות.

MEMS - Micro Electro Mechanical Systems

RF - Radio Frequency

FCB - Flip Chip Bonding

PCB – Printed Circuit Board

CPW - Coplanar Waveguide

MS – Microstrip

SMT - Surface Mount Technology

SOI – Silicon on Insulator

BGA – Ball Grid Array

w – Gap between ground and signal conductors in a CPW structure.

S – Signal conductor width in a CPW structure

g_0 – Initial air gap between switch and waveguide

W' – Switch width (along waveguide Z axis)

L – Switch length (perpendicular to waveguide Z axis)

t – Switch layer thickness

ϵ_s - effective wave guide permittivity constant

ϵ_d - Permittivity constant of dielectric layer

t_d – Thickness of dielectric layer

ρ - Resistivity of Metal

פרק 1 - מבוא.

פרק זה כולל תיאור כללי של טכנולוגית המיקרו מערכות (להלן MEMS) ושל הרכיבים הממומשים בעזרתה בתחום התדר הגבוה (להלן RF MEMS). בהמשך מוצג ביתר פירוט תיאור של משפחות המתגים (RF MEMS switches) שמומשו עד כה, כולל גישות המימוש, הטכנולוגיות, מעטפת הביצועים והנושאים העומדים בחזית המחקר בתחום.

1.1 תיאור כללי של טכנולוגית MEMS

טכנולוגית MEMS – או Micro Electrical Mechanical Systems ובתרגומה לעברית טכנולוגית מיקרו מערכות (ו/או מיקרו עיבוד = Micromachining) הינה טכנולוגיה חדשה יחסית המגלמת פוטנציאל רב בקישור בין תחום המיקרו אלקטרוניקה (הכולל אלקטרוניקה אנלוגית ודיגיטלית ברמת השבב) לעולם הפיסיקלי החיצוני (חיישנים ומתמרים – Sensors and Actuators).

המיקרו מערכות כוללות בד"כ תתי מערכות אלקטרוניות ומכניות משולבות זו בזו כך שהשימוש שנעשה בתהליכי הייצור המבוססים של תעשיית החצאי מוליכים מאפשר יצירת מערכות בעלות יכולת חישה או הפעלה בקנה מידה קטן בהרבה מהקיים היום – ובעלויות קטנות יותר.

קיימות שתי גישות בסיסיות ליצירת מיקרו מערכות – מערכות אחודות (משולבות) (Monolithic) ומערכות מבוזרות (Hybrid). לכל אחת מגישות אלו יתרונות וחסרונות אך הן בעלות עיקרון בסיסי זהה: שילוב ברמות הבסיסיות ביותר בין אמצעי הממשק של המערכת (מתמרים פיזיקליים ← אלקטרוניים ← פיזיקליים) לאמצעי השליטה שלה (הבקר האלקטרוני).

במהלך העשור האחרון הודגמו עשרות רכיבי MEMS ומיקרו מערכות בתחומים שונים: מתחום ראשי ההדפסה (נחירי הזרקת דיו ממוזערים) דרך בקרי השליטה על כריות אוויר ברכב (מדי תאוצה), רכיבים ביומטריים (שימוש במיקרו-תעלות להפרדת חומר אורגני בשיטות אלקטרוכימיות), בתחום המתגים/ממסרים החשמליים ולאחרונה בתחום רכיבי התדר הגבוהה – תחום הנקרא RF MEMS. בתחום ה-RF MEMS הודגמו רכיבים ממשפחות שונות: שיפור ביצועי קווי תמסורת ורכיבים פסיביים ע"ג פיסות סיליקון מבודדות ועל ממברנות, מתגים לתחומי תדר שונים, פילטרים מכניים וכו'.

בהתבסס על בשלות ונפח הייצור הזמין של תעשיית המיקרו אלקטרוניקה, התרכז עיקר המאמץ המחקרי בתחום המיקרו מערכות- במימוש מבנים תלת-מימדיים על גבי (ותוך כדי) שימוש בסיליקון כחומר הגלם או המצע. כמו כן התהליכים הטכנולוגיים בהם נעשה שימוש הינם התהליכים המקובלים בתעשייה זו: חמצון הסיליקון, נידוף מתכות, שימוש בתהליכי ליטוגרפיה ואיכול רטוב ויבש של שכבות שונות.

המייחד את תחום המיקרו מערכות הינו היכולת לייצור מבנים בעלי אפיון תלת מימדי, המאפשר, במידת הצורך, תנועה של חלקים מסוימים במערכת. אפיון זה מאפשר את האינטראקציה עם הסביבה, בין אם בפעולת חישה (Sensing) של גדלים פיזיקליים ובין אם בהפעלה/הזזה (Actuation) של מבנים בכדי לקבל תוצאה רצויה.

1.2 סקר ספרות

1.2.1 רכיבים מבוססי MEMS לתדר גבוה – סקירה כללית

תחום ה- RF MEMS התפתח מתוך תחום המיקרו מערכות בתחילת שנות ה-90. בתחילה מומשו מתגים לתדרים נמוכים ואח"כ הודגמו מספר מתגים לתחומי תדר גבוהים יותר. עם הזמן הופיעו יותר ויותר רכיבים מבוססי מיקרו מערכות לתדרים הגבוהים יחסית של בין 10 ל- 60 גה"צ. בסקירה שלהלן יוצגו משפחות הרכיבים העיקריות שפותחו בתחום זה.¹

במהלך השנים הראשונות למחקר ויישום תהליכי מיקרו עיבוד בסיליקון, יושומו קווי תמסורת ורכיבים פסיביים (סלילים למשל) ע"ג ממברנות סיליקון אוקסיד/ניטריד בכדי להקטין את ההפסדים בשכבת המוליך למחצה.

המתג הראשון שתוכנן ויושם לתחום התדר הגבוה בוצע במימון בטחוני אמריקאי (DARPA) במעבדות יוז (Hughes) בשנת 1991. מתג זה הראה ביצועים טובים עד לתדר של 50 גה"צ, ביצועים טובים בהרבה ממה שניתן היה להשיג בטכנולוגיית GaAs. עם פרסום תוצאות אלו החלו מספר קבוצות, שוב במימון ממשלתי אמריקאי, לפעול לפיתוח הטכנולוגיה ובשנת 1995 הציגו מספר מעבדות מחקר ביטחוניות מתגים שונים (מתג מגע ומתג קיבולי) לתדרים של עד 120 גה"צ.

עם פרסום התוצאות החלה פעילות ענפה של מספר רב של מכוני מחקר וחברות אלקטרוניקה גדולות, במאמץ ליישם ולפתח מתגים מבוססי MEMS ייעודיים לתחומי התדרים הרלוונטיים ולשימושיהם השונים. התמריץ העיקרי להשקעות בתחום זה היה, שלמרות ההתקדמות הגדולה בתחום GaAs HEMT ובתדרי העבודה שהגיעו אליהם בטכנולוגיית ה-CMOS, תדירות הקטעון בדיודות p.i.n שמשמשות למיתוג קווי תמסורת ומטריצות נשאר נמוך מדי (בסביבות 2000 גה"צ) – לטכנולוגיה חדשה זו פוטנציאל להגיע לתדרי קיטעון גבוהים בהרבה (40000 גה"צ).

סקירה כללית של השימושים השונים בטכנולוגיית RF MEMS מצביעה על ארבעה תחומים עיקריים²:

- **רכיבים בדידים** בהם מתגים, קבלים משתנים וסלילים הודגמו בתחומי תדרים שבין DC ל- 120 גה"צ. המתגים והקבלים המשתנים כוללים אלמנט נע (מספר מיקרוניים) והסלילים בד"כ ממומשים כהתקנים תלת מימדיים מנותקים או מבודדים מהמצע – להקטנת הפסדים.

- **תתי מערכות** בהם קווי תמסורת, רזונטורים בעלי גורם איכות (Q) גבוה, פילטרים ואנטנות המתאימים לתדרים של עד 200 גה"צ הודגמו על גבי מצעי סיליקון מדוקקים או ע"ג ממברנות.

- **פילטרים** מבוססי MEMS העושים שימוש בויברציות מכניות של קורות ממוזערות לקבלת תהודה עם גורם איכות גבוה מאוד ($Q > 8000$) זאת בתדרים של כ- 200 מה"צ.

- **FBAR** – פילטרים מבוססי שכבות דקות (נכלל במסגרת מיקרו עיבוד) העושים שימוש בגלים אקוסטיים לסינון האותות החשמליים ומשיגים גורמי איכות גבוהים ($Q > 2000$) בתדרים של כ- 3 גה"צ.

1.2.2 מתגים מבוססי MEMS לתדר גבוה

כפי שצוין בסעיף הקודם, מתגים מבוססי MEMS החלו להופיע ממחצית שנות ה-90 בקונפיגורציות, טכנולוגיות מימוש ותחומי תדרים שונים אולם עיקרון המיתוג העומד בבסיס ההתקנים - זהה. עקרון המיתוג הבסיסי גורס כי המיתוג משנה את העכבה של קו תמסורת בצורה פיזית (ע"י שינוי מבני) בין שני מצבי קיצון:

- קו התמסורת ללא הפרעה - מעביר מלוא ההספק.
- קו התמסורת מנותק (או מקוצר לאדמה) כך שהגל חוזר למקור.

השימוש ביכולת התנועה הנגזרת מהשימוש במיקרו עיבוד, מספק מרווח אוויר פיזי בין המתג לקו התמסורת ובנתון זה נעוץ עיקר היתרון של רכיבים אלו. קבל האוויר הנוצר (מרווח של מספר מיקרונים) מספק את הבידוד הנדרש גם בתדרים גבוהים ואת הלינאריות ברוחב פס רחב – הביצועים אינם תלויים בהתקני מוליכים למחצה כלל (אין השפעה למוביליות של נושאי מטען כתלות בתדר).

בהשוואה של מתגי MEMS (אלקטרוסטטיים) למתגים סטנדרטיים מבוססי p.i.n או FET ניתן להבחין בהבדלים העקרוניים הבאים¹:

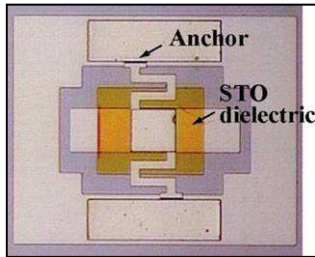
PARAMETER	RF MEMS	PIN	FET
Operating Voltage	30-80	$\pm 3-5$	3-5
Current (mA)	0	3-20	0
Power Consumption (mW)	0.05-0.1	20-200	0.05-0.2
Switching Time (us)	1-300	0.01-0.1	0.01-0.1
Cutoff Freq. (THz)	20-80	1-4	0.3-0.5
Isolation (1-4 GHz)	Very High	High	Medium
Isolation (30-40GHz)	Very High	Medium	Low
Isolation (70-100 GHz)	High	Medium	None
Loss (db)	0.05-0.3	0.4-1.2	0.4-1.6
Power Handling	<1	<10	<10

טבלה 1 – השוואת טכנולוגיות מתגים

Table 1 : RF switches technology comparison

קשה לבצע השוואה מלאה בין הטכנולוגיות כיוון שהגדלים והפרמטרים תלויים בהספק הנדרש להעברה, בכל אופן ניתן לראות כי למעט מהירות המיתוג המהווה חיסרון מרכזי בטכנולוגיה זו, הפרמטרים האחרים מצביעים על יתרון ברור בהספקים נמוכים למתגי MEMS.

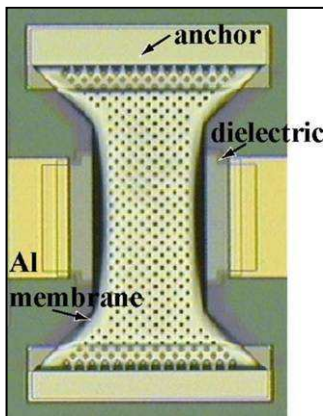
להלן מספר דוגמאות למימוש מתגים:



מתג מקבילי קיבולי שמומש ע"י חברת LG בקוריאה³, עושה שימוש בשכבת STO (Strontium Titanate Oxide) בעל מקדם דיאלקטרי גבוה, לשם הקטנת גודל המתג.

תמונה 1 – מתג קיבולי (LG)

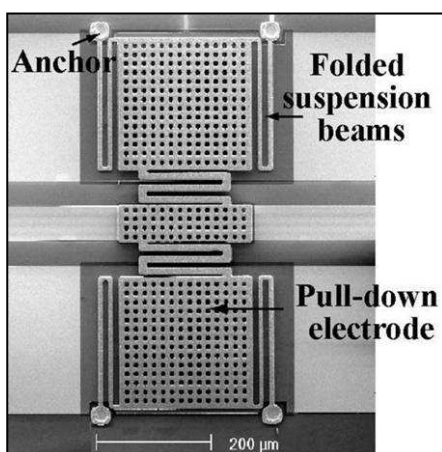
Picture 1 – Capacitive switch by LG, Korea



מתג מקבילי קיבולי שמומש ע"י חברת Raytheon⁴ עושה שימוש בחירור הממברנה לשם הקטנת הגרר בעת התנועה והגדלת מהירות המיתוג.

תמונה 2 - מתג קיבולי (Raytheon)

Picture 2 - Capacitive Switch by Raytheon



מתג מקבילי קיבולי שמומש באוניברסיטת מישיגן⁵, בעל מתח הפעלה נמוך (כ- 10 וולט), עושה שימוש בקפיצים כפולים להשגת קבוע קפיץ נמוך במיוחד.

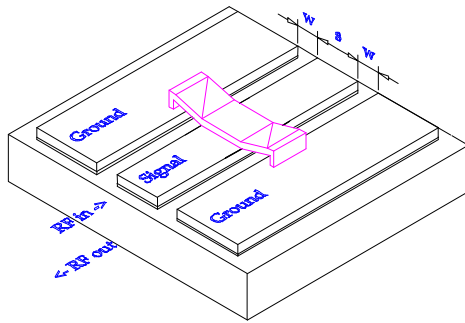
תמונה 3 – מתג קיבולי מתח הפעלה נמוך (UoM)

Picture 3– Low voltage Capacitive switch (UoM)

1.2.3 עקרונות פיזיקליים

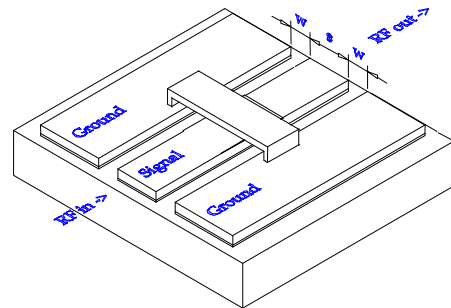
להלן תיאור כללי של העקרונות הפיזיקליים עליהם מבוסס המיתוג והמדדים המאפיינים של המתג. ע"י שימוש בקו תמסורת קופלנרי (Co-planar waveguide – CPW) ניתן להדגים את שיטת המיתוג.

במצב רגיל קו התמסורת הקו פלנרי מתוכנן (בהתאם למצע) לעכבה ידועה (תרשים 1). במקרה זה המתג ממומש בדומה למבנה של גשר אויר – ומקצר את שני משטחי האדמה, במצב זה המתג מוגדר במצב לא פעיל - Off - והמתג הינו מסוג N.C. (Normally closed). (השימוש בגשרי אויר מקובל בקווי תמסורת מסוג זה לשם תאום פאזה בצמתים, השפעתו על פרמטרי קו התמסורת קטנה מאוד). עם העברת המתג למצב פעיל, קורס המתג ומקצר את קו המוליך המרכזי לקוי האדמה (תרשים 2):



תרשים 2 – מתג מקבילי/קיבולי – מצב פעיל

Figure 2 – Shunt Capacitive switch – On state



תרשים 1 – מתג מקבילי/קיבולי, מצב לא פעיל

Figure 1 – Shunt Capacitive switch – Off state

בהנחה שהעומס במרכז קו התמסורת הינו בעל עכבה נמוכה מאוד (חיבור מוליך למשל) - $Z_L = 0 \text{ ohm}$, ניתן למצוא את מקדם ההחזרה ע"י הנוסחה הבאה:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad , \quad Z_L = 0 \Rightarrow \Gamma = -1$$

ומתקבל כי הגל חוזר במלואו תוך היפוך פאזה - כלל המתגים הממומשים מהווים וואריאציות סביב העיקרון הנ"ל.

פעולת המתג אינה אידיאלית כמובן, והעכבה המתקבלת איננה אפס אוהם - לכן גם אין החזרה מוחלטת.

להלן תיאור המשתנים העיקריים המתארים את ביצועי המתג (חלקם תלויי תדר) והגדרתם מתבססת על מבנה המתג שהוצג (במתג טורי הגדרות On ו-Off כמו הגדרות N.C. או N.O. יכולות להיות שונות):

- Insertion Loss – מוגדר כיחס בין ההספק העובר בקו התמסורת, בין כניסה ליציאה, טרם המצאות הרכיב וההספק העובר בקו התמסורת, בין כניסה ליציאה, בעת המצאות הרכיב. במתג הנ"ל נמדד במצב Off (ב- db).
- Isolation – מידת ההספק העובר בקו התמסורת, בין כניסה ליציאה, למרות אפקט המתג. לדוגמא, כשהמתג הנ"ל במצב פעיל (במצב On) וחוסם את האות - נמדד ב- db.
- Cutoff Freq. – תדר הקטעון, התדר המרבי בו תומך המתג ללא השפעה על האות העובר דרכו.
- Switching time – זמן מיתוג בין מצבים מרגע הפעלת אות בקרה חשמלי. נמדד בשניות.
- Power Consumption – ההספק הנדרש למיתוג בין מצבים. נמדד בג'אול.

1.2.4 סיווג מתגים מבוססי RF-MEMS

ניתן לחלק את הגישות השונות למימוש מתגים לפי מספר מאפיינים עיקריים, המפרידים בין צורת יישום אחת לרעותה:

- שיטת הפעלת המתג (אלקטרוסטטית, טרמית, מגנטית, פייזואלקטריט) וההספק הנדרש לכך.
- סוג מגע (מתג לקו תמסורת): אוהמי, כלומר מגע מוליך במוליך, או מגע קיבולי (דרך שכבה דיאלקטריט).
- חיבור ברשת – מתג בחיבור טורי (Series) לקו הסיגנל, מתג מקבילי (Shunt) – בין קו הסיגנל לקווי האדמה.
- טכנולוגית הייצור וטכנולוגית האריזה על פיהן מוגדר בסיס/מצע המתג = קו התמסורת אותו ממתגים. סוג קו התמסורת, והשליטה במצע עליו ממומש קו התמסורת משליכה ישירות על תכן המתג.

ההבדלים במעטפת הביצועים של המתגים מאפשרים חלוקה נוספת על פי הפרמטרים הבאים:

- מהירות מיתוג (on->off, off->on) – מהירות המיתוג אינה סימטרית ונקבעת ע"י קצב המיתוג האיטי יותר.

- הספק מקסימלי – ההספק המקסימלי של האות הממוטג שאינו גורם לכשל ברכיב.

- אורך חיים – מספר מחזורי הפעלה עד לכשל.

להלן מובא פרוט של עיקרי המאפיינים שהוצגו לעיל, תוך תיאור השוואתי של יתרונות וחסרונות כל מאפיין.

שיטות הפעלה – הפעלת המתגים מבוצעת בשיטות שונות הנגזרות מתחום ה-MEMS בכללו.

הפעלה אלקטרוסטטית - שיטת ההפעלה הנפוצה ביותר :

תנועת הרכיב מושגת ע"י הפעלת מתח חשמלי בין אלקטרודות מבודדות חשמלית. מתח זה יוצר כוח משיכה אלקטרוסטטי המאפשר תנועה בת מספר מיקרונים של האלקטרודות. יתרונה העיקרי של שיטה זו הוא בהספק מזערי הנדרש להפעלה (הזרם רק במהלך התנועה – טעינת קבל). חסרונה העיקרי – המתח הנדרש גבוה יחסית (80-20 וולט). במידה ורוצים לממש רכיב בעל מתח הפעלה נמוך ניתן לתכנן קבועי קפיץ מכני נמוכים, מצב זה בד"כ מתבטא בפגיעה באמינות. גודל הרכיב בדרך כלל קטן (מסה קטנה) ומאפשר לכן זמן מיתוג קצר.

הפעלה טרמית, מגנטית או פייזואלקטריט :

הפעלת רכיבים באחת מהשיטות הנ"ל מחייבת בד"כ מימדים גדולים בהתאם לאופיים של האפקטים הפיזיקליים. בדרך כלל נצרך הספק רב יותר – הן לשם המיתוג והן לשם החזקת המתג במצבו השונים. חסרונות : צריכת הספק. בד"כ מבנה גדול – זמן מיתוג גדול. יתרונות : ניתן להשיג כוח מגע גדול יותר – התנגדות המתג יורדת – ההפסדים קטנים.

סוג מגע – אופי המגע החשמלי בין המתג ומוליכי קו התמסורת.

מגע אוהמי : מגע ישיר בין משטח מוליך אחד למשנהו :

- א. מאפשר מיתוג בתחום תדרים של DC עד 60 גה"צ.
- ב. בעייתי למעבר הספק גבוה בשל כשלים נקודתיים במשטח המגע – נדרשים חומרים שונים מהמקובל בכדי לשפר איכות המגע ואמינותו.

מגע קיבולי : ההולכה מושגת דרך שכבה דיאלקטרית דקה (בתדר גבוה מספיק העכבה מינימאלית) :

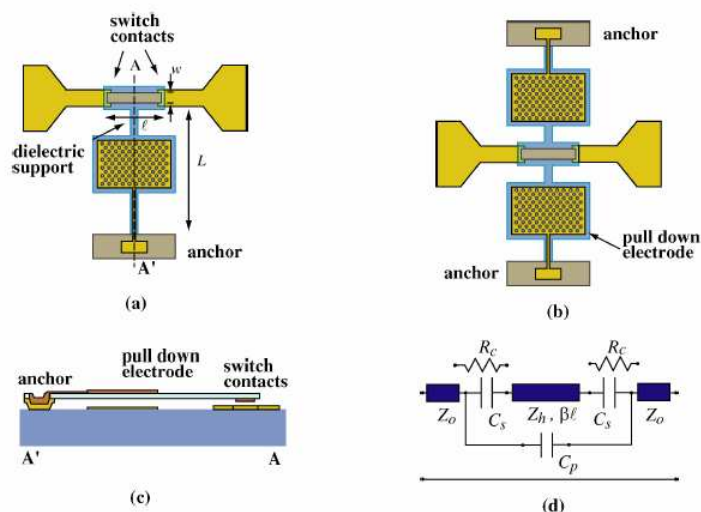
- א. מאפשר מיתוג בתחום תדרים מ-10 עד 200 גה"צ.
- ב. משטח המגע עמיד יותר.
- ג. מהווה קבל צימוד, אינו מאפשר מיתוג DC.

חיבור לרשת – חיבור המתג ביחס לקו התמסורת:

חיבור טורי:

- אופייני לקוי מיקרו סטריפ, בדרך כלל המתג בקונפיגורציה N.O.
- מבנה הרכיב חורג מגבולות קו התמסורת (בולט לצדדים) – ראה תרשים 3.

Physical Description of Series Switches (Broadside)



The University of Michigan

Rebeiz June 2002

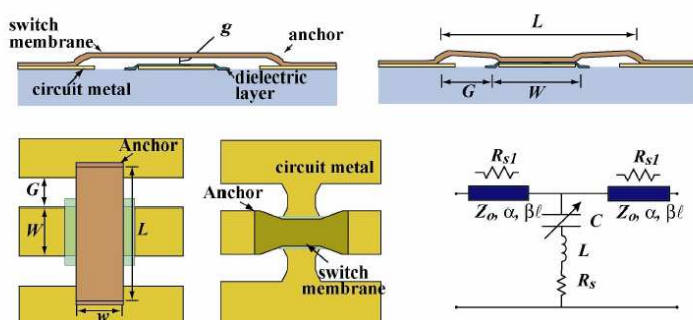
תרשים 3 – חיבור מתג בצורה טורית (Series)

Figure 1 – Series switch network connection

חיבור מקבילי:

- אופייני בד"כ לקווים קו-פלנרים בד"כ המתג בקונפיגורציה N.C.
- המבנה בד"כ מוכל בגבולות קו התמסורת (בנוי מקו אדמה אחד למשנהו) ראה תרשים 4:

RF MEMS Shunt Capacitive Switch



The University of Michigan

Rebeiz June 2002

תרשים 4 – חיבור מתג בצורה מקבילית (Shunt)

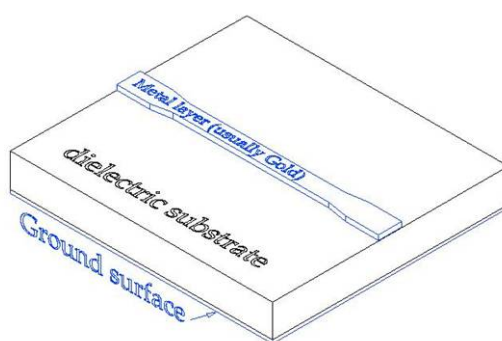
Figure 2 – Shunt capacitive switch network connection

טכנולוגיית ייצור – סוג המצע וקו התמסורת על בסיסו ממומש המתג :

בתחום תדרי ה-RF הולכת האות/גל החשמלי מתבססת על שימוש בקווי תמסורת ולא במוליכים בדידים. קיימים מספר סוגים שונים של קווי תמסורת בשימוש בתעשייה, אך הבולטים ביניהם, בהם נעשה שימוש בטכנולוגיית MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit), הינם קו המיקרו סטריפ (Microstrip) והקו הקו-פלנרי (CPW – Coplanar Waveguide).

מוליך הגל הראשון מסוג Microstrip, הינו המקובל יותר, ומאפשר הובלה של האות בין קו הסיגנל המוגדר בצידה האחד של פיסה דיאלקטרית (בד"כ אלומינה) לאדמה המשותפת בצידה השני. המוליכים מיוצרים על-ידי תהליכי ליטוגרפיה של שכבת זהב עבה – 2 עד 4 מיקרון.

נתק בקו המיקרו סטריפ או קצר לאדמה ישנה מהותית עכבת הקו. כאן נקבל עומס התלוי באורכו של הגדם (stub), תוך החזרה מלאה של ההספק.



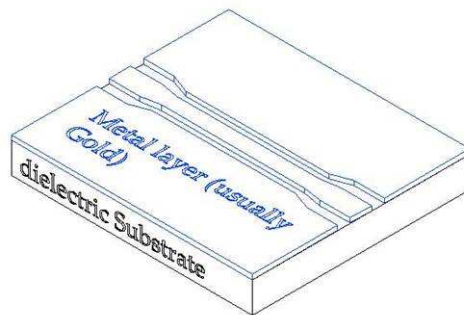
תרשים 5 - קו תמסורת מסוג Microstrip

Figure 3 – Microstrip waveguide

מוליך הגל השני, הינו מוליך הגל מסוג CPW (תרשים 6). למוליך גל זה מספר יתרונות טכנולוגיים כשהבולטים ביניהם הינם :

- א. מאפשר שימוש בטכנולוגיית SMT (Surface Mount Technology) לרכיבים פסיביים ואקטיביים כיוון שהן קו הסיגנל והן קווי האדמה נמצאים על פני המצע – בדומה למעגלי PCB סטנדרטיים.
- ב. מונע את הצורך בייצור חורים עוברים במצע (Via) לשם חיבור לאדמה.
- ג. הקטנה של הפסדים כתוצאה מקרינה.
- ד. הקטנה של הפסדים כתוצאה מ-Cross talk.

מבנה ואפיון קווי התמסורת מהווה נושא למחקרים רבים העוסקים בשיטות לחישוב פרמטרי הקו ושיטות תכן וייצור לקווים בעלי תכונות שונות (עכבות נמוכות למשל, מסננים, מהודים וכו').



תרשים 6 - קו תמסורת מסוג Coplanar Waveguide

Figure 4 – Coplanar waveguide - CPW

מעטפת הביצועים של המתג, גם היא מגדירה את סיווגו, פרוט הפרמטרים העיקריים מוצג להלן :

מהירות מיתוג

פרק הזמן משינוי המתח עד לשינוי מצב המתג. נמדד ע"י מדידת התנועה המכנית והזמן לריסונה. ניתן גם למדוד עפ"י התייצבות תופעת המעבר של אות ה-RF הממותג - מדידה זו רלוונטית בעיקר במתגים המופעלים במצב של Hot Switching – (כלומר ממותגים כשקו התמסורת פעיל). מאפייני מנגנון המיתוג אינם סימטריים. התנועה המכנית מושגת במרבית המקרים ע"י הפעלת כוח כנגד קפיץ מכני, מכאן מתברר ששלב המיתוג בו התנועה מבוצעת ע"י כוח מאלץ מרוסנת במהירות רבה יותר מאשר הריסון הטבעי של קפיץ מכני.

הספק מקסימלי

ההספק המקסימלי של האות הממותג שאינו גורם לכשל ברכיב. ההספק המוחזר (או מועבר) ע"י המתג - עובר כולו דרך גוף המתג, וחלקו, כתלות בהפסדים ובהתנגדות האוהמית במשטח המגע ובמוליכים, יוצר מקור חום שעלול לגרום שינוי פרמטרים ואף לכשל מכני של הרכיב.

אורך חיים

מספר מחזורי מיתוג עד לכשל. כמות מחזורי המיתוג עד לכשל של הרכיב. ברוב המקרים המדווחים הכשל אינו מכני (שבר בחלק הנע) אלא משילוב של אפקטים חשמליים הגורמים להידרדרות באיכות המיתוג - פגיעה במשטחי המגע והגדלת ההתנגדות או "תקיעה" של המתג במצב מחובר בשל אפקטים חשמליים מצטברים : טעינת שכבת הממשק מתכת דיאלקטריקן או שיתוך מתכות.

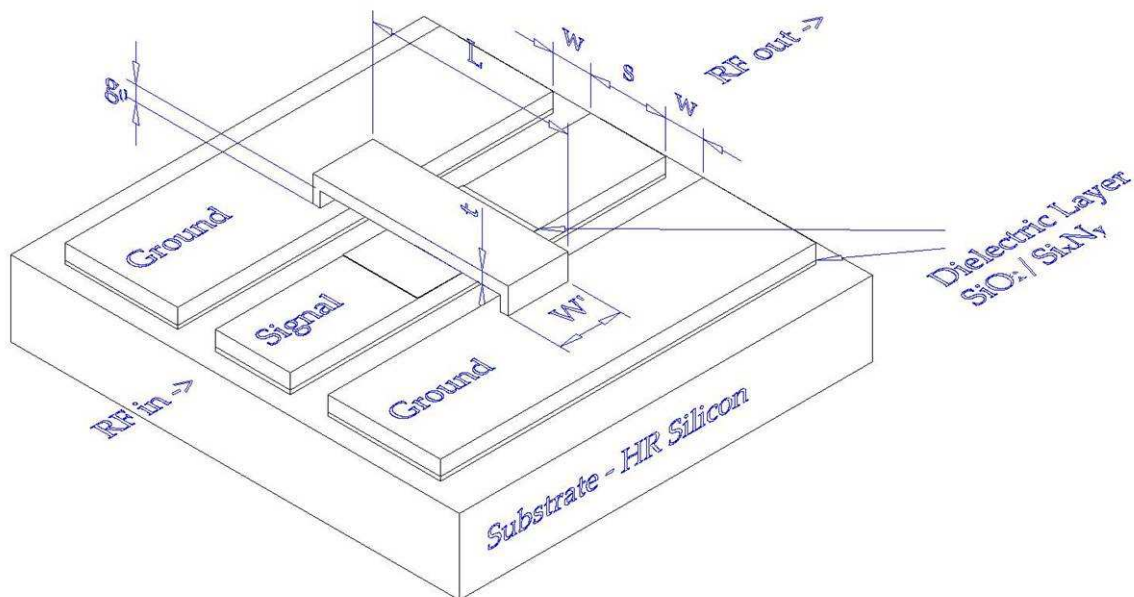
1.2.5 ניתוח אנליטי של מתג מקבילי, קיבולי אופייני (Shunt Capacitive Switch)

לשם ניתוח כמותי של מתג, התמקד המחקר בסוג מסוים: מתג מקבילי-קיבולי. צורת החיבור המקבילית (Shunt) תואמת את טכנולוגית המימוש בתחום המיקרואלקטרוניקה על מצעי סיליקון (תצורת קו CPW) ותדר העבודה שהוגדר במסגרת מחקר זה (26-40 GHz) גבוה מספיק בכדי לאפשר מימוש קיבולי. על בסיס סוג מתג זה בוצעו התכן והמימוש המוצגים בפרקים הבאים.

להלן יוצג ניתוח מכני, אלקטרו מכני וניתוח ההשפעה בתדר גבוה של מבנה מתג אופייני ממשפחה זו. מכיוון שמאפייני המתג בשלושת הקטגוריות הנ"ל קשורים זה בזה, הניתוח מתחיל בהצגת ארכיטקטורת המתג, ומגדיר את הפרמטרים המבניים המופיעים בשאר המודלים הפיסיקליים (סעיף 1.2.5.1 להלן). הבסיס התיאורטי למודל מיתוג בתדר גבוה (שני מצבי המיתוג) מתואר בסעיף 1.2.5.2 ועיקרי המודל המכני וההפעלה האלקטרוסטטית - בסעיף 1.2.5.3. רגישות המודלים למאפייני המתג מתוארת בסעיף 1.2.5.4.

1.2.5.1 מבנה גיאומטרי ומאפייני חומרים:

בתרשים הבא מוצג מבנה של מתג מקבילי/קיבולי. המתג ממומש על גבי מצע סיליקון (התנגדות גבוהה) ומיוצר בטכנולוגיה של שכבות דקות. בתרשים מצוינים גדלים גיאומטריים עיקריים המשפיעים על מאפייני המתג המכניים, המאפיינים בתחום מיתוג התדר הגבוה ואופי פעולת הפעלת המתג (הפעלה אלקטרוסטטית).



תרשים 7 – מבנה גיאומטרי אופייני של מתג מקבילי קיבולי

Figure 5 – basic Shunt Capacitive switch architecture

המבנה הגיאומטרי מוגדר ע"י הפרמטרים הבאים, כמתואר בתרשים 7 :

משתנים גיאומטריים :

משתנה	תיאור	ערך אופייני	משפיע על...	הערות/סימונים
w	מרווח אות- אדמה	20-50 מיקרון	עכבת קו תמסורת	Z_0
S	רוחב קו אות	10-50 מיקרון	עכבת קו תמסורת	Z_0
g_0	מרווח מתג קו	2-5 מיקרון	הפסדים במצב Off מתח הפעלה	Insertion Loss Actuation Voltage
W'	רוחב מתג	20-80 מיקרון	מתח הפעלה	Actuation Voltage
L	אורך מתג	100-300 מיקרון	קבוע קפיץ	Spring Constant
t	עובי מתג (מתכתי)	1-3 מיקרון	זמן מיתוג	Switching Time

טבלה 2 – מימדים גיאומטריים והשפעתם על מאפייני המתג

Table 2 – geometrical dimensions and their effect on switch parameters

תכונות חומרים ומשתנים נוספים :

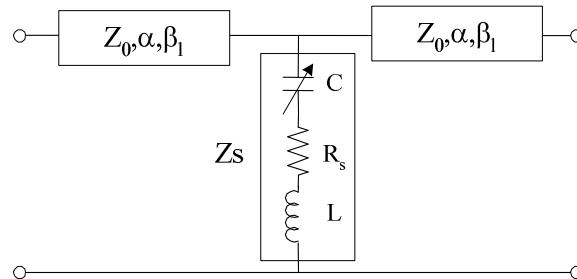
משתנה	תיאור	ערך אופייני	משפיע על...	הערות/סימונים
ϵ_s	מקדם דיאלקטרי של חומר המצע	6-9	עכבת קו תמסורת	Z_0
ϵ_d	מקדם דיאלקטרי של השכבה הדיאלקטרית המשמשת ליצירת המיתוג הקיבולי	6-9	בידוד	Isolation
t_d	עובי דיאלקטריקן	0.1 מיקרון	בידוד	Isolation
ρ	חומר מתג (זהב למשל)	$2.2 \mu\Omega \text{ cm}$	התנגדות מתג	R_s

טבלה 3 – תכונות חומרים והשפעתם על מאפייני המתג

Table 3 – building material effect on switch parameters

1.2.5.2 מיתוג תדר גבוה – מודל מקובץ :

מבנה המתג ממומש על גבי קו תמסורת לתדר גבוה (CPW) כמתואר בתרשים 7 לעיל. בכדי לבנות מודל אנליטי, מוצגים קו התמסורת והמתג ע"י מודל מקובץ. המתג המקבילי/קיבולי מופיע כענף מקבילי בעל פרמטרי התנגדות השראות וקיבול משתנה כמתואר בתרשים 8 :



תרשים 8 - מודל חשמלי מקובץ למתג קיבולי

Figure 6 – Lumped element model of shunt capacitive switch

אימפדנס המתג נתון ע"י מודל RLC טורי וניתן להציגו על-ידי המשוואה הבאה :

$$2 \quad Z_s = R_s + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

משוואה זו מתארת מעגל בעל תדר תהודה f_0 :

$$3 \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ניתוח משוואה 2 שלעיל, בהתאם לסוג המודל שבחרנו, מצביע על התנהגות שונה של עכבת המתג בהתאם לתחום התדר :

$$4 \quad Z_s = \begin{cases} \frac{1}{j\omega C} & \text{for } f \ll f_0 \\ R_s & \text{for } f = f_0 \\ j\omega L & \text{for } f \gg f_0 \end{cases}$$

1. בתדר הנמוך מתדר התהודה -עכבת המתג מתנהגת כקבל.

2. בתדר התהודה העכבה ממשית בלבד.

3. מעל תדר התהודה העכבה השראותית.

בעת חישוב והצבת ערכי הקיבול המשתנה במצב ON ובמצב OFF ניתן להבחין בתכונות הבאות :

1. במצב OFF תדר התהודה הינו בתחום של מספר מאות גיגה הרץ (בשל הקיבול הקטן הנובע מפער האוויר) ולפיכך להשראות ולהתנגדות אין כל תרומה. יותר מכך הקיבול נמוך עד כדי כך שעכבת הרכיב גדולה מאוד ובעצם כמעט ואינה משפיעה על קו התמסורת.

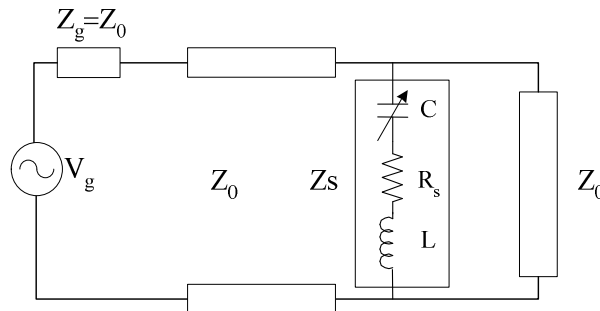
2. במצב ON מתקבל תדר תהודה בתחום רצוי (וניתן לתכנון) של מספר עשרות גיגה הרץ כך שהעכבה המתקבלת נמוכה מאוד ומהווה למעשה קצר בקו התמסורת – מצב בו קיימת החזרה של הגל המתקדם בקו.

את הערך המשתנה של הקיבול (C) ניתן לחשב אנליטית על ידי שימוש בהנחה שהמבנה דומה לקבל לוחות. המרחק בין הלוחות משתנה עפ"י שני מצבי קיצון – המרחק במצב Off מוגדר כ- g_0 (מרווח אוויר), והמרחק המינימאלי במצב On מוגדר כ- t_d (עובי הדיאלקטריקן).

התנגדות המתג R_s , ניתנת לחישוב מתוך מדידות פרמטרי המתג, במצב פעיל כאשר האות הממותג מופעל בתדר התהודה שלו (ניתן לחלץ איבר זה מתוך גרף של s-parameters) או מתוך סימולציות של תוכנות חישוב לתדרים גבוהים, המתחשבות בפילוגי הזרם במוליך ובאפקט השפה. ערכי ההשראות L, ניתנים לחישוב ע"י תוכנות אלמנטים סופיים כאשר הגשר במצב ON, תוך הזנחת הקיבול והתאמת התוצאות למודל L-R בלבד.⁶

בכדי לאפיין את התכן, נדרשים מאפייני המיתוג הקשורים להפסדי ההספק המועבר (Insertion Loss) במצב Off ולבידוד (Isolation) במצב On.

אם מציגים את המתג במסגרת רשת זוגיים, כאשר העומס מתואם לקו התמסורת, כבתרשים 9 :



תרשים 9 - מודל קו תמסורת ומתג מקבילי

Figure 7 – Lumped element model of waveguide and shunt switch

ניתן להציג את מקדם ההחזרה :

$$5 \quad \Gamma_L = S_{11} = \frac{Z_s || Z_0 - Z_0}{Z_s || Z_0 + Z_0} = \frac{Z_s \cdot Z_0 - Z_0(Z_s + Z_0)}{Z_s \cdot Z_0 + Z_0(Z_s + Z_0)} = \frac{-Z_0}{2 \cdot Z_s + Z_0}$$

ובהצבת Z_s נקבל :

$$6 \quad S_{11} = \frac{-Z_0}{2 \left(R_s + i\omega L + \frac{1}{i\omega C} \right) + Z_0} = \frac{-i\omega C \cdot Z_0}{2 - 2\omega^2 LC + i\omega C \cdot (Z_0 + 2R_s)}$$

ומקדם ההחזרה של ההספק :

$$7 \quad |S_{11}|^2 = \frac{\omega^2 C^2 Z_0^2}{(2 - 2\omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 \cdot (Z_0 + 2R_s)^2}$$

במצב Off, הקיבול קטן מאוד ולפיכך תדר התהודה גדול מאוד (מאות GHz) ולכן בהזנחת תרומת ההשראות

וההתנגדות $Z_s \approx \frac{1}{i\omega C}$, מצטמצם הביטוי ל-

$$8 \quad |S_{11}|^2 \Big|_{f \ll f_0} = \frac{\omega^2 C^2 Z_0^2}{4 + \omega^2 C^2 Z_0^2}$$

ובצורה דומה ניתן לחשב את ה- Insertion Loss :

$$9 \quad |S_{21}|^2 \Big|_{f \ll f_0} = \frac{4}{4 + \omega^2 C^2 Z_0^2}$$

וכמובן שמתקבל השוויון הבא, בהזנחת הפסדים :

$$10 \quad |S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1$$

במצב On, כאשר הקיבול גדול מספיק, ישתנה הבידוד עפ"י מידת הקרבה לתדר התהודה.

בסביבת תדר התהודה יתקבל בידוד מעולה, הנובע רק מההתנגדות הממשית הטורית :

$$11 \quad S_{21} = \frac{V_+ + V_-}{V_+} = 1 + \frac{V_-}{V_+} = 1 + S_{11} = 1 + \frac{-Z_0}{2 \cdot Z_s + Z_0} = \frac{2 \cdot Z_s}{2 \cdot Z_s + Z_0}$$

$$|S_{21}| \Big|_{f \approx f_0} = \frac{2 \cdot R_s}{2 \cdot R_s + Z_0} \approx \frac{2 \cdot R_s}{Z_0}$$

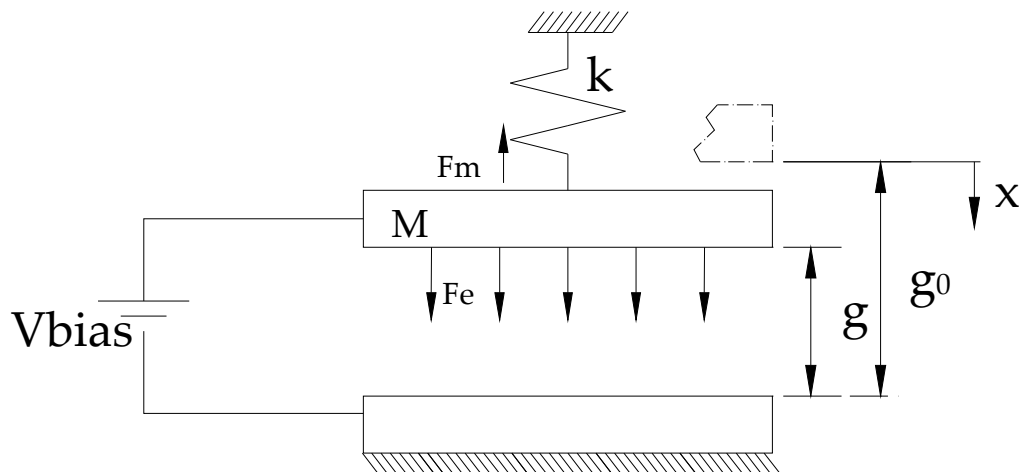
בתדר נמוך מתדר התהודה, ניתן (שוב) להזניח את תרומת ההשראות והתנגדות ומתקבל בידוד (Isolation)

הניתן להערכה ע"י נוסחה 12 :

$$12 \quad |S_{21}|^2 \Big|_{f \ll f_0} \approx \frac{4}{\omega^2 C_d^2 Z_0^2}$$

1.2.5.3 המאפיינים המכניים וההפעלה אלקטרוסטטית :

המבנה המכני של המתג ניתן למידול ע"י אלמנטים מכניים מקובצים (בדומה למידול המקובץ החשמלי). ניתן להתייחס בקירוב ראשון למערכת המתג כמערכת אלקטרו-מכנית המורכבת מרכיבים בדידים, כמתואר בתרשים 10 :



תרשים 10 – מודל מכני מקובץ של מתג אלקטרוסטטי

Figure 8 – Lumped mechanical model of an electrostatic actuator

לוח בעל מסה (m) רתום לקפיץ בעל קבוע קפיץ (k), מעל מצע סטטי. המרווח הראשוני בין הלוח למצע הינו g_0 . הכוחות הפועלים על הלוח הינם הכח המכני (מבוסס הקפיץ), הכח החשמלי (בהינתן מתח V_{bias}) וכח שיכוך/גרר הפועל על המתג בזמן התנועה בלבד. מערכת מכנית פשוטה זו מאפשרת לנתח את ההתנהגות הדינאמית של המתג.

אם נרשום את משוואות התנועה של הרכיב ללא הפעלת כח חשמלי :

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + kx = 0$$

כאשר m הינה מסת המתג, β הינו קבוע הריסון הנובע משיכוך עקב גרר באוויר ו- k קבוע הקפיץ. הפתרון מיידי, ובהנחת השיכוך, נקבל תנועה הרמונית בתדר העצמי של המערכת –

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}} \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right] \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} [\text{Hz}]$$

במידה וקיים שיכוך מסוים (ובהנחת שיכוך תת-קריטי), נקבל תנועה מרוסנת, עפ"י היחסים הבאים :

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{k}{M}} \left[\frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right] \\ \gamma &= \frac{\beta}{2M} \end{aligned} \right\} \lambda = \sqrt{\omega^2 - \gamma^2} \rightarrow f = \frac{\lambda}{2\pi} [\text{Hz}]$$

משוואות תנועה חופשית זו של המתג, מתארת את הדינאמיקה של המיתוג ממצב On למצב Off.

עם הפעלת מתח חשמלי בין הלוח הנייד ללוח הקבוע, ניתן לרשום משוואות המתארות את סך הכוחות הפועלים על הלוח :

הכוח המכני – כוח קפיץ מחזיר, נוצר בעת תנועת המתג ותלוי ב :

1. קבוע הקפיץ המכני של המבנה. (k)

2. הסטייה ממצב שיווי המשקל. ($g_0 - g$)

$$13 \quad F_m = k(g - g_0) \quad [\text{N}]$$

הכוח האלקטרוסטטי הנובע מהמתח הקיים בין הלוחות :

תוך הנחת מודל של קבל לוחות אינסופיים בעל שטח A וללא התחשבות בקווי השדה ההיקפיים :

$$14 \quad F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{g^2} V_{bias}^2 \quad [\text{N}]$$

בעת הפעלת מתח חשמלי נע המתג כלפי קו התמסורת עד לשוויון בין הכוחות והתייצבות המתג, במרווח $x = g_0 - g$ מעל קו התמסורת :

$$F_e + F_m = 0$$

המודל האלקטרוסטטי מתאר את סגירת מרווח האוויר בין הלוחות, כפונקציה של מתח נתון, בהתבסס על תיאור המערכת בתרשים 8. מודל זה נחקר רבות בהקשרים של תנועת רכיבי MEMS שונים^{7,8}. מידול אלקטרו-מכני של מערכת זו מצביע על שני תחומי הפעלה מבחינת יציבות התנועה :

תחום הפעלה ראשון מוגדר כתחום (המתחים) בו המערכת נעה בין מצבי שיווי משקל בהם מתאזנים הכוחות האלקטרוסטטיים והמכניים – האלקטרודה מתקרבת למשטח התחתון בעקבות הכוח האלקטרוסטטי המופעל ונעצרת כשחל שיוויון בין כוח זה לכוח הקפיץ המכני. מצב זה מתרחש עד לכדי סגירת כשליש מהמרווח $g \sim 0.67g_0$ ומתבסס על מודל פלטות מקבילות.

תחום ההפעלה השני חל כשהמתח המופעל גדול ממתח סף מסוים. מהלך תנועה זה אינו יציב. במידה ומופעל מתח (V_{bias}) גדול מספיק - מעבר למרווח מסוים נוצר משוב חיובי לכוח החשמלי. התרומה לכוח החשמלי עקב הקטנת המרווח, גדולה מהתרומה לכוח המכני, לפיכך ממשיך המתג לנוע ולהקטין את מרווח האוויר עד סגירתו. מעבר לסף המיקום, הגידול בכוח האלקטרוסטטי גדל באופן מעריכי (כפונקציה של המרחק בין הפלטות - g), פרופורציונית ל- $1/g^2$, לעומת הכוח המחזיר המכני הגדל בתלות ישירה במרחק התנועה $(g_0 - g)$, המרווח g קטן תוך תאוצת הפלטה עד לסגירתו ועצירה במגע פיזי בין האלקטרודות.

תופעה זו נקראת Pull In, ומתח הסף לקיומה - V_{pi} . התופעה נחקרת מזה מספר שנים כתלות בגיאומטריות שונות ובהתאם לאופני בקרת מתח שונים. להלן ניתוח בסיסי של המודל, מותאם למבנה המתג המקבילי. משוואה 15 מתארת את סף המתח הגורם לתופעת ה-Pull-in ומגדירה את מתח ההפעלה למתג:

$$V_p = \sqrt{\frac{8k}{27\varepsilon_0 W' s}} g_0^3 \text{ [Volt]} \quad 15$$

המשוואה מתבססת על הפרמטרים הבאים:

- קבוע הקפיץ k .
- השטח המשותף לקו התמסורת ולמתג בהיטל על A – מוגדר כמכפלת רוחב המתג ברוחב קו הסיגנל ($W's$)
- הקבוע הדיאלקטרי של התווך - אוויר בד"כ (ε_0)
- המרחק הראשוני בין שתי הלוחות (g_0)

המשוואות הדינאמיות המתארות את מעבר המתג ממצב Off למצב On, סבוכות יותר כיוון שהן כוללות, לאחר סגירת המרווח הראשוני, מנגנוני שיכוך שונים (Thin film damping) ומנגנוני התנגשות ומגע בהם מאבד המתג אנרגיה. לרוב מבוצעים חישובים מקורבים לקבלת פרמטרים כמו מתח ההפעלה, וזמן המיתוג ומבוצעים תיקונים לאנליזות בהתאם לתוצאות.

1.2.5.4 רגישות לפרמטרי תכן:

אם בוחנים את המשוואות הנ"ל, ניתן לכאורה לזהות כי הגדלת g_0 תקטין את הקיבול במצב OFF והקטנת t_d תתרום להגדלת הקיבול במצב ON ובכך לשיפור היחס $Con/Coff$ ושיפור ביצועי המתג:

- * בפועל לא ניתן להגדיל את g_0 בצורה משמעותית (מעל $\sim 6 \mu m$) כיוון שמתח ההפעלה הנדרש (משוואה 15) יגדל בצורה מעריכית ולא יהיה ישים לשילוב עם מעגלים אלקטרוניים נוספים.
- * הקטנת עובי שכבת המבדד t_d מוגבלת לכ- $\sim 1000 \text{ \AA}$, עובי קטן יותר גורר חורים מקומיים (Pin Holes) בשכבה דרכם נפרץ המבדד ← נוצר זרם גבוה ובעקבותיו שריפת הרכיב.

שינוי פרמטרים נוסף, כמו למשל הגדלת שטח החפיפה (כלומר הרחבת הגשר) תשפר את ביצוע הניתוק (Isolation) בהקשר לביצועי RF אך תפגע בזמן המיתוג בשל ריסון התנועה הדינמית הנובע מכמות האוויר שיש לדחוס בין הגשר למצע.

בחינה של המודל האלקטרוסטטי לחישוב מתח ההפעלה, והמודל לחישוב הקיבולים המאפיין את טיב המיתוג, מראה שקיים צימוד גיאומטרי חזק ביניהם, שני הפרמטרים:

- השטח A , המחושב על ידי מכפלת רוחב המוליך האמצעי (s) ברוחב הגשר (W').
- גובה הגשר מעל קו התמסורת (g_0)

מופיעים בשני המודלים והביצועים המכניים וביצוע המיתוג מושפעים מהם באופן הפוך.

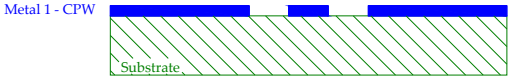
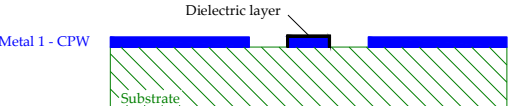
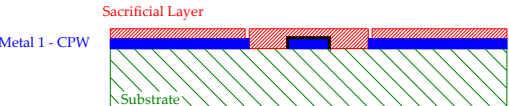
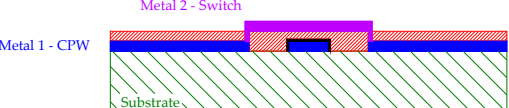
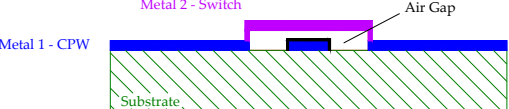
הפרסומים המציגים מתגי RF-MEMS מאופיינים בשתי שיטות מימוש עיקריות. הראשונה, וללא ספק הנפוצה ביותר, הינה שיטת המימוש בטכנולוגית שכבות דקות⁹. שיטה זו נפוצה ביותר בטכנולוגית המיקרו אלקטרוניקה והמיקרו עיבוד בכלל ומקובלת גם בייצור מעגלי MMIC. שיטה זו מתבססת על ייצור קו התמסורת ומעליו ייצור המתג ברצף תהליכי אחד, תוך שימוש בשכבת הקרבה (Sacrificial layer) בכדי ליצור את מרווח האוויר המבוקש במתג.

השיטה השנייה מבוססת על שימוש בחיבור היברידי בין קו התמסורת למתג¹⁰. כאן ממומש קו התמסורת בנפרד וגוף המתג בנפרד והחיבור מבוצע כשלב אחרון בתהליך המימוש, כאשר המתג מחובר ע"י ציוד הרכבה למקום ספציפי מעל הקו.

1.2.6.1 מימוש בטכנולוגית שכבות דקות (Thin Film):

טכנולוגית שכבות דקות הינה הטכנולוגיה השלטת בכל שוק השבבים - בכל מגוון האפליקציות וסוגי המצעים, בין אם מדובר בשבבי CMOS ע"ג סיליקון או שבבי MMIC ע"ג GaAs למשל. הטכנולוגיה מבוססת על בניית רכיבים בחומר המצע בשכבת הבסיס ואח"כ בניה של שכבה אחר שכבה של שכבות מתכתיות תוך ביצוע תהליכי ליטוגרפיה להגדרת מוליכים, קבלים, נגדים (ואף סלילים). במסגרת התהליכים הקיימים לא נוצרים מרווחים בין שכבה לשכבה ואין מצב בו נוצר חלל. במסגרת שיטות המיקרו עיבוד, משולבות שיטות נוספות לשם יצירת חללים (Cavities) ושחרור חלקים - זאת בכדי לאפשר תנועה של חלקים שונים ואינטראקציה בין הרכיב ותופעות פיסיקליות חיצוניות.

להלן רצף תהליכים מבוסס שכבות דקות המייצג שיטה מקובלת לייצור המתג :

- בחירת מצע מתאים לתדרויות RF.
- 
2. מימוש קו תמסורת כשכבה ראשונה
- 
3. ציפוי קו המוליך בשכבה דיאלקטית
- 
4. השמת שכבת הקרבה – העובי קובע את מרווח האוויר העתידי, פתיחת מגעים לאדמות
- 
5. נידוף וליטוגרפיה של מבנה הגשר, עובי השכבה ותכונותיה משפיע מהותית על קבוע הקפיץ.
- 
6. הסרת שכבת ההקרבה – שחרור המתג.
- 

תרשים 11 – שלבי ייצור מתג בטכנולוגית שכבות דקות

Figure 9 – Switch fabrication via Thin Film based process.

תהליכים מסוג זה מופיעים במגוון מאמרים רב^{13,12,11} - יתרונם בפשטות התהליך ובשימוש בטכנולוגיה קיימת ומוכחת למימוש ההתקן. חסרונם העיקרי הינו בשונות הפונקציונאלית המתקבלת. שונות בעובי שכבות המתכת ותכונותיהן (בעיקר מאמצים שיוריים), ושונות במרווח האוויר המתקבל – גם באותו רצף תהליכי על גבי פיסה בודדת - גורמים לערכי מתח הפעלה בטולרנסים של עשרות אחוזים. בעיה עקרונית נוספת קשורה לתהליך שחרור שכבת ההקרבה – הוצאת "הפיגום" מחיבת שימוש באמצעי ניקוי מיוחדים וכרוכה בנפל רב, עקב הידבקות המתגים למשטח (תופעה הידועה כ- Stiction).

1.2.6.2 מימוש בטכנולוגיית היברידית - שימוש בהשמה מדויקת בתהליך Flip Chip Bonding

טכנולוגיית השמה זו התפתחה מתוך תחום הזיווד האלקטרוני. במסגרת זיווד שבבים אלקטרוניים סטנדרטי, השבב מודבק על גבי מארז ומתבצע חיבור ע"י "תפירה" של חוטי זהב דקים בין נקודות החיבור בשבב (Pad's) לנקודות חיבור פנימיות במארז. תהליך חיווט זה נקרא Wire-Bonding. כל עוד שטח השבבים היה קטן יחסית ומספר הכניסות/יציאות לא עלה על מספר עשרות, שיטה זו פעלה (ועדיין פועלת) מצוין ואפשרה שילוב נוח של השבבים ע"ג לוחות אם (PCB). השבבים, הגדלים כל הזמן בשטחם, מספר כניסות ויציאות המגיע עד למאות וההגדלה המתמדת בתדר העבודה חייבו שיטות אריזה שונות. בין שיטות אלו ניתן לציין יצירת מארז הרמטי כחלק מתהליך הייצור המיקרו-אלקטרוני, מארזים המתבססים על שיטות חיבור למצע כמו BGA (Ball Grid Array) ולאחרונה טכנולוגיית ה-Flip Chip המספקת יתרונות רבים בתהליך הזיווד. טכנולוגיית זו מתבססת על הנחת שבב אלקטרוני שנקודות החיבור שלו חשופות - במהופך - ע"ג המצע המיועד לו.

בצורת מימוש זו מושגים היתרונות הבאים:

- א. בעת ההנחה ניתן לחבר בפעולה אחת מספר רב מאוד של נקודות חיבור (תהליך מקבילי בניגוד לתהליך הטורי של חיווט חוטי זהב).
- ב. התהליך מאפשר הגדלה משמעותית במספר נקודות החיבור (אין צורך לחווט רק מהיקף השבב אלא ניתן ליצור מגעים בכל שטחו)
- ג. בהקשר של תדר הפעולה - נמנע השימוש בחוטי זהב ארוכים ששיבשו והוסיפו השראות מיותרת (ובד"כ בלתי ניתנת לחישוב) מהמעגל החיצוני לשבב.

לאחר ההנחה והחיבור החשמלי מוזרק חומר דבק בין השבב למצע (המרחק הינו מספר עשרות מיקרונים) וכך מושגת גם יציבות מכאנית טובה.

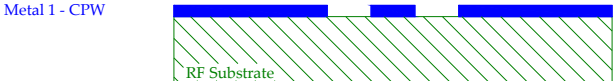
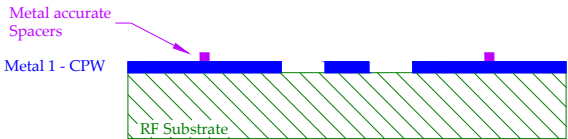
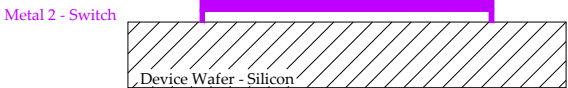
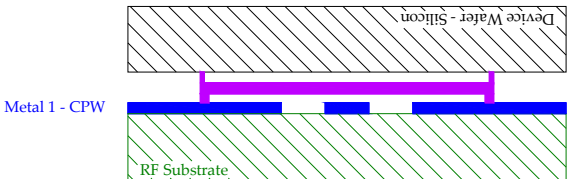
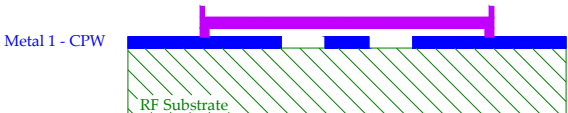
יתרון נוסף לשיטה זו הינו היכולת לחבר שבבים מטכנולוגיות שונות למצעים שונים, למשל חיבור רכיב אופטי/תדר גבוה הממומש על-גבי מצע של GaAs על-גבי רכיב לוגי הממומש בטכנולוגיית CMOS בסיליקון.

עם התפתחות הטכנולוגיה וזיהוי הפוטנציאל בתחום הזיווד וגם בתחום ההרכבה של רכיבים היברידיים - דיוקי ההשמה שופרו וכיום ניתן לבצע השמה של רכיב ע"ג מצע בדיוק אופקי של כ-2 מיקרון (ואף פחות) ודיוק אנכי של מיקרונים בודדים, תוך שמירה על מקבילות גבוהה ביניהם (לשם וידוא שכל נקודות המגע במישור אכן יחוברו).

דיוקים אלו אפשרו בשנים האחרונות שימוש בטכנולוגיה זו, ליצירת/הרכבת מערכות מיקרו-אלקטרו-מכאניות רבות. פעולות אלו יושמו בתחילה במסדות אקדמיים¹⁴ אולם כיום משמשות גם חברות מסחריות לייצור התקנים שונים¹⁵.

להלן רצף תהליכים מבוסס טכנולוגית חיבור היברידית המייצג שיטה מקובלת לייצור המתג :

1. בחירת מצע מתאים לתדירויות RF.

2. מימוש קווי התמסורת כשכבה ראשונה (ניתן גם לביצוע במסגרת מעגלי MMIC)

3. יצירת מרווחים מדויקים מעל קו התמסורת

4. ייצור המתג בתהליכי שכבות דקות ייעודיים - ע"ג מצע אחר

- ביצוע זיווד Flip Chip Bonding – הפיכת המתג על פני המצע

6. הסרת הפיסה התומכת.


תרשים 12 – שלבי ייצור מתג בטכנולוגיית FCB

Figure 10 – Switch fabrication via Flip Chip Bonding.

יתרון שיטה זו הינו בגמישות ייצור אבי טיפוס וביכולת לשלב בין טכנולוגיות, כאשר כל חלק של המתג מבוצע בטכנולוגיה מוכחת ומוכרת. בנוסף היכולת לבנות את הרכיב מסיליקון גבישי, ולא משכבות דקות, וכן האפשרות לארוז ולאטום את הרכיב בעת החיבור מעניקות אפשרויות תכן נוספות לטיפול בבעיות הספק והדירות.

חסרון הגישה הינו בצורך בתהליך אינטגרציה נוסף מה שהופך את תהליך הייצור לטורי ולא מקבילי כמו בגישה הקודמת.

בסקירה רחבה של הפרסומים העוסקים במתגי MEMS עולים מספר מנגנוני כשל מובנים, חלקם אופייניים לטכנולוגית המיקרו עיבוד בכללותה וחלקם ספציפיים לאפליקציה זו.¹⁷¹⁶

מנגנון כשל בסיסי המשותף לרכיבי MEMS רבים הינו אפקט ההידבקות (Stiction) – המרווח הקטן בין המתג לקו התמסורת בשילוב קבוע קפיץ קטן יחסית (בכדי לאפשר מתח הפעלה נמוך) הופך את הרכיב לרגיש מאוד ללחות וזיהומים (אבק). בהמצאות לחות בעת הפעלת מתג אפשרי מצב בו הכוח המכני המחזיר אינו מספק אל מול מתח הפנים של שכבה נוזלית/אורגנית הנלכדת במרווח והמתג נשאר במצב ON ללא אפשרות ניתוק.

כלל המתגים רגישים לבעיה זו – הפתרון המקובל הינו אריזה הרמטית באווירת חנקן, נתוני המדידות המופיעים במאמרים רבים מתבססים על מדידות מתג לא ארוז תחת אווירת חנקן.

מנגנון כשל נוסף המתבטא בתופעה זהה (מתג נשאר במצב ON) נובע משינוי משטח המגע של המתג :

* במתגים בעלי משטח מגע מוליך - מתכת למתכת - יורדת איכות המגע עקב הזרם וחסימת המשטח. בהספקים בינוניים ובמידה ומבוצע מיתוג חם (מיתוג בעת העברת אות בקו) נפגע משטח המגע עד למצב בו ההתנגדות החשמלית משפיעה על ביצועי המתג או שמבוצע שיתוך מתכות והמתג נשאר במצב ON.

* במתגים בעלי משטח קיבולי קיימת תופעה של טעינת ממשק המגע בין השכבה הדיאלקטרית ושכבת המתכת. במידה ומצטבר מטען מספק (מלכודות בפני השטח) גם לאחר איפוס מתח ההפעלה – יישאר המתג במצב ON עקב הכוח האלקטרוסטטי שנוצר.

מנגנון כשל נוסף הינו הפעלה עצמית – במידה והספק אות ה-RF העובר גדולה מספיק – יכול להיווצר ממתח מספק בין קו הסיגנל לאדמות שיגרום להפעלת המתג – כשל זה אופייני למתגים מקביליים בהספקים בינוניים וגבוהים.

מבחינת מנגנוני הכשל, ניתן לרכז את הסיבות לכשל והצעות לפתרון על פי אופי משטח המגע ובהתאם להספק המועבר ¹:

סוג מגע	רמת הספק	מנגנון כשל	פתרון מוצע
קיבולי	נמוכה (1 mW)	טעינת ממשק דיאלקטריקן	שיפור באיכות דיאלקטריקן (פחות מלכודות) הפעלה ע"י מתח משתנה (חיובי- שלילי)
	בינונית (10-100 mW)	טעינת ממשק צפיפות זרם גבוהה	כני"ל שכבת מתכת עבה יותר במתג
	גבוהה (>100 mW)	הפעלה עצמית צפיפות זרם גבוהה	הפרדת אלקטרודות הפעלה מקו התמסורת מבנה מוקשח ומתכות עבות יותר.
מתכת ל- מתכת	נמוכה (1 mW)	פגיעה בטיב משטח המגע חירור מתכת והיווצרות תחמוצות	שיפור איכות המתכות במגע
	בינונית (10-10 mW)	צפיפות זרם גבוהה שיתוך ואלקטרומיגרציה	מתכות עבות יותר הגדלת כוח לחיצה
	גבוהה (>100 mW)	כני"ל ועליית טמפרטורה באזור המגע	כני"ל ושיפור מעבר החום.

טבלה 4 - מנגנוני כשל במתגים

Table 4 - Failure mechanisms in MEMS switches

אמינות המתגים, הנמדדת במספר מחזורי הפעלה, תלויה באופן ישיר בהספק המועבר בקו התמסורת ובמתג. בפועל הוצגו מתגים עם מספר מחזורים גבוה עד כדי 7 ביליון מחזורים (במיתוג קר). רב התוצאות עדיין מצויות בסביבות 10^7 מחזורים.

להלן טבלה מרכזת של מספר מחזורים מתוך ¹ :

מספר מחזורים מדוד (במיליונים)	סוג מיתוג	הספק RF (mW)	רמת זרם (mA)	מתג
53	מיתוג קר	6000	350 (50 MHz)	חב' Cronos
1	מיתוג קר		500-1000 (DC)	חב' Analog Devices
20-100	מיתוג קר	30	25 (35 GHz)	מעבדות Rockwell
1-10	מיתוג חם		10 (DC)	חב' אומרון
1-10	מיתוג חם		100 (DC)	אוני' Caltech
7000	מיתוג קר	-	-	אוני' Illinois

טבלה 5 – השוואת מספר מחזורי הפעלה

Table 5 - Switch operating cycles comparison

1.2.8 זיווד ואריזה

כפי שצוין בסעיף הקודם רכיבי MEMS בכלל והמתגים בפרט רגישים מאוד ללחות ולזיהומים אחרים במשטחי המגע. בפועל רכיבים המוצעים כיום למדידות ו/או מופיעים בהתקנים סבוכים יותר (מתגי SPDT או Phase Shifters) מחייבים אריזה הרמטית בסביבת גז אינרטי.

האריזות מהוות נטל מבחינת ביצועים כיוון שקיימים הפסדים (כבכל רכיב לתדר גבוה) במעבר אל ומחוץ למארז. בנוסף הדרישה לאטימה מחייבת תכן ייעודי של המארז.

הסיבה לקיום אווירה אינרטית במארז – ולא וואקום, הינה שבכדי לשמור על זמני מיתוג סבירים בעת שחרור המתג (ממצב ON למצב OFF) מסתמכים רב המתגים על החיכוך בגז כדי לרסן את התנועה. שחרור קפיץ מכני בוואקום גורר תנועה בעלת ריסון נמוך – זמן התייצבות במצב OFF ארוך.

כיום מוגדרת האריזה כגורם עיקרי למסחור הנמוך של מתגים אלו, העלות הנדרשת למימוש אריזה הרמטית כתהליך אריזה נוסף לאחר הייצור גבוהה מעלות מימוש המתג עצמו.

פרק 2 - מטרות המחקר

עבודה זו באה להציע ולבחון ישימות של מבנים חדשים, לשם מימוש מתגים מבוססי טכנולוגיית MEMS.

כתחום עיקרי לעבודה זו נבחר תחום המתגים המשמשים למיתוג אותות בעלי תדר גבוה. מתגים אלו נמצאים בחזית המחקר של תחום המיקרו מערכות, ומיועדים לשמש כאבן בניין בסיסית לתתי מערכות מסובכות יותר: מטריצות ניתוב כניסות ויציאות, מסיטי פאזה (Phase shifters) למערכות מכ"מ, מכשירי מדידה ובוררי ערוצי שידור/קליטה למערכות תקשורת. רבות מהמערכות הנ"ל מתבססות ומודגמות בימים אלו על בסיס מתגים מסוג זה, בשל אוסף התכונות יוצא הדופן שטכנולוגיה זו מציעה. המתגים, כרכיבים מכניים ממוזערים, מציעים את היתרונות הטמונים במערכות מקרוסקופיות בתחום המיתוג לתדר גבוה. הבידוד הגבוה וההפסדים נמוכים אינם ייחודיים למתגים אלו אך המימדים המאפשרים אינטגרציה נוחה למערכות המיקרו-אלקטרוניות ומאפשרים מימוש חדשני ושונה למערכות.

בכדי להציב רכיב בסיסי שיאפשר בניית תתי מערכות סבוכות יותר בהמשך, פנה מחקר זה למימוש רכיב בעל מבנה חדשני וגמישות תכנונית רבה. המחקר נבנה כך שיאפשר בחינה והערכה של רעיונות תכן תוך התאמה לצרכים ולאבי טיפוס לתתי-מערכות עתידיים שונים. כמטרת ביניים הוגדר גם ניתוח המצב הקיים והגדרת האתגרים העיקריים ויעדי הביצועים של הרכיב כך שיושמו מספר פתרונות אפשריים לאתגרים אלו. מטרות המחקר הוגדרו לאחר ניתוח המתגים שמומשו והוצגו בספרות המדעית ותוך השענות על הידע הטכנולוגי המצטבר בקבוצת המיקרו מערכות.

מטרות המחקר הן:

- א. בדיקת צורת מימוש מבנה דינאמי בסיליקון גבישי, כשיטת ייצור אמינה ואמצעי לשיפור הדירות הפרמטרים המכניים של המתג.
- ב. חקירת ואפיון תהליך הזיווד ההיברידי, כתהליך גנרי למימוש מתג ואריזתו.
- ג. תכנון ומימוש של מתג לאותות בתדירות גבוהה תוך עמידה ביעדים אופייניים לרכיב זה.
- ד. הגדרת תהליך המדידה לשם אפיון הרכיב והשוואת התוצאות לתכן.
- ה. בניית בסיס לתכן רכיבים עתידיים, כך שתוצאות המחקר יאפשרו המשך פעילות מחקר למימוש התקנים מתקדמים יותר.

פרק 3 – תיאור העבודה

העבודה במסגרת המחקר כללה מספר שלבים עיקריים, עפ"י המטרות שהוגדרו לעיל.

השלב הראשון בעבודה כלל סקר ספרות, ניתוח המצב הקיים והגדרת אתגרים עיקריים בביצועי המתג כפי שהוצגו בפרק הראשון.

השלב השני במחקר כלל הגדרת נקודת עבודה ראשונית, ועל פיה הוגדרה הארכיטקטורה הכללית של הרכיב. לאחר הגדרת דרישות ובחירת הארכיטקטורה, בוצעו שלושת שלבי התכן והמימוש הבאים:

א. תכן ויישום קו תמסורת קו פלנרי ע"ג מצע סיליקון בעל התנגדות גבוהה - כבסיס למימוש המתג.

ב. תכנון, סימולציות מבניות וסימולציות תדר גבוה למבנה היברידי, מבוסס סיליקון גבישי.

ג. תכנון תהליך המימוש, ייצור רכיבי המתג והרכבתו - ע"י תהליך השמה היברידי.

לאחר הרכבת רכיבים בוצעו מדידות אלקטרו-מכניות ומדידות תדר גבוה בכדי לאפיין את המתג בשני תחומים שונים אלו.

בהתאם לפרויקט מיתוג סטנדרטי (pin diodes) שבוצע בתעשייה, הוגדר תחום התדרים בין 26-40 גה"צ, כטווח התדרים בו על המתג לפעול. בשלב ראשוני זה הוגדרו משתני התדר הגבוה הנוספים, על פי המספרים האופייניים המופיעים במרב הפרסומים:

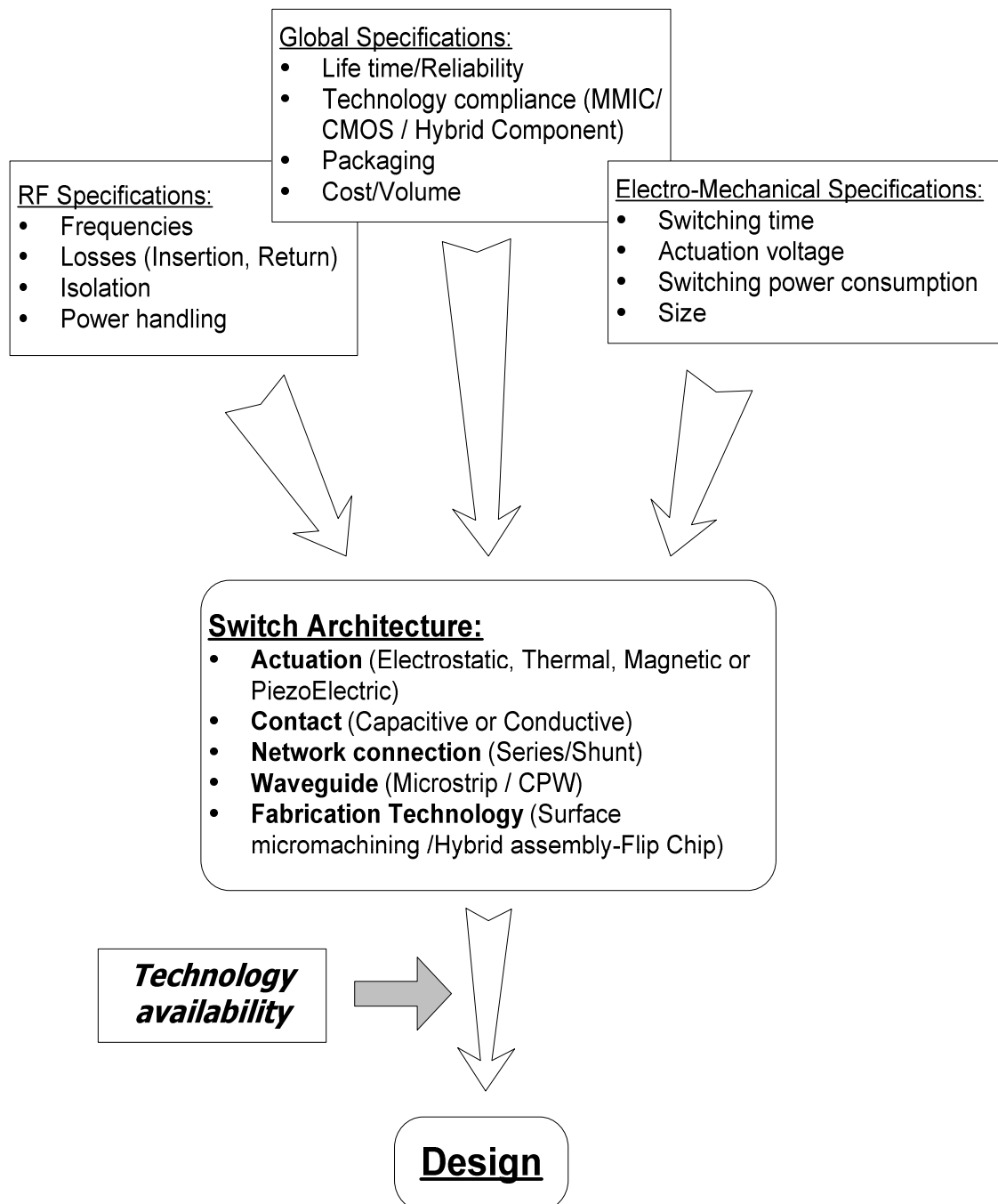
Insertion Loss < 0.2db

Isolation > 20 db

ומתח ההפעלה המיועד עמד על כ- 40 וולט.

שאר הפרמטרים הטכניים המאפיינים, כמו אמינות/מספר מחזורים, הספק מקסימלי וכו' הוגדרו כאתגרים אותם יש לבחון בתהליך המימוש תוך מתן מרחב בחירה בפרמטרים הגלובליים כמו הטכנולוגיה, האריזה והגודל.

תחילת פעילות תכן מתג מסוג זה חייבה בחינה משולבת של כלל האפיונים הנדרשים, ממספר תחומי תכן שונים ועל פיהם להתכנס לארכיטקטורה המתאימה ביותר ליישום. בתרשים 13, מוגדרים השלבים השונים בהגדרת מבנה הרכיב עוד לפני שלב התכן הפרטני. במסגרת מחקר זה הוגדרה גם זמינות טכנולוגית כפרמטר עקרוני בתהליך התכן זאת בכדי לאפשר מימוש הרכיב תוך תכנון והכרת כל שלב ייצור והשפעתו על ביצועי הרכיב.



תרשים 13 - תהליך גיבוש מבנה מתג

Figure 11 – Switch Architecture definition process

3.1 בחירת ארכיטקטורת רכיב

בהמשך לסקר הספרות הוחלט על מספר מאפיינים בסיסיים של המתג:

- א. **צורת מימוש/הרכבה** – נבחרה צורת מימוש היברידית.
(למרות שזהו התהליך האחרון ברצף התהליכים למימוש מתג, השפעתו עקרונית על כל שאר פרמטרי התכן) - לאחר בחינת האפשרויות, הוחלט לפתח את היכולת לממש את המתג באופן היברידי. יתרונות גישה זו הינם בגמישות במימוש הרכיב והיכולת להפריד (בעיקר במובן שיטת הייצור הטכנולוגית) בין קו התמסורת למתג (המתג ממומש בסיליקון, קו התמסורת ע"ג GaAs למשל כחלק ממערכת MMIC כוללת). בחירה זו מאפשרת בחינת מספר רעיונות חדשים לשיפור פרמטרים כמו הספק מקסימלי, אמינות מיתוג, אריזה וכו' – שאינם אפשריים במימוש מונוליטי בשכבות דקות בלבד.
 - ב. **שיטת המיתוג** – נבחרה הפעלת אלקטרוסטטית.
יתרונות שיטה זו רבים: חיסכון בהספק בעת ההפעלה ואמינות ופשטות המימוש (גודל פיזי קטן יחסית ומסובכות מבנית נמוכה – ללא חומרים לא מקובלים או רכיבי אקטואציה נוספים).
 - ג. **סוג קו התמסורת** – קו תמסורת קו פלנרי.
הסיבות לכך הינם ההתאמה לשיטות הייצור המיקרו מכניות הזמינות והיכולת לממש גם ע"ג סיליקון (בניגוד למיקרו סטריפ), קו זה מאפשר הרכבה היברידית בצורה נוחה, תואם למעגלי MMIC סטנדרטיים ומאפשר חיבור המתג למצעים שונים בכדי לבחון מבנים ומעגלים מתקדמים יותר בעתיד.
 - ד. **צורת חיבור ברשת** - מתג בצורה מקבילית
החיבור בצורה מקבילית כך שהמתג מקצר את קו הסיגנל לקווי האדמה, מאפשר מימוש המתאים למאפיינים הקודמים תוך שימוש במשטחי האדמה עצמם כאלקטרודות הסטטיות בעת ההפעלה האלקטרוסטטית.
 - ה. **סוג מגע** – מגע קיבולי.
הבחירה במיתוג קיבולי מתאפשרת בשל טווח התדרים הרצוי (Ka), ומאפשרת את יתרונות אמינות משטח המגע האופייניים לשיטה זו. ע"י מימוש המתג במבנה שונה מהרגיל נבחנת גם הקטנת רגישות שכבת הדיאלקטריקן למספר ההפעלות.
- טכנולוגיה זמינה** – הדגש על תכנון המתג בהתבסס על יכולות קיימות במרכז למיקרואלקטרוניקה, הגדיר פרמטרי תכנון שונים, וביניהם:
- א. הגדרת סוג השכבות (מתכות/מבדדים) בהקשר של ייצור המבוסס שכבות דקות ותהליכי מיקרו-מכניקה בחדרים הנקיים.
 - ב. הגדרת גודל וצורת מארז לשם תכנון תהליך ההשמה וההרכבה על בסיס מערכת Flip Chip Bonding המופעלת במסגרת מחקרי קבוצת ה-MEMS, ככלי אינטגרציה מדויק.

מבנה ואריזת המתג – במסגרת פיתוח מבנה המתג נבחנו המגבלות העיקריות הקיימות על רכיבים אלו – קרי צורת האריזה (משליך על האמינות) כמות ההספק המקסימלי בו הרכיב מסוגל לעמוד ובעיות ההידבקות המוגדרות כמנגנוני כשל עיקריים.

מכיוון שהחיבור ההיברידי משחרר מהצורך ליישם את גוף המתג בטכנולוגית שכבות דקות, נבחנו דרכים להתמודד עם מגבלות ההספק והאריזה על ידי תכן מקורי - הוחלט על הפרדת משתנים בין החלק המכני והחשמלי של הרכיב.

- גוף הרכיב עליו מתבססת התנועה המכנית מבוצע בסיליקון גבישי (מהווה חומר גלם בעל תכונות מכניות ותרמיות הדירות)

- משטחי הקיבול האחראיים על האפקט החשמלי ימומשו כך שלא ישפיעו על התכונות המכניות של הרכיב.

סיכום צורת המבנה :

ארכיטקטורת הרכיב שנבחרה הינה של מתג מקבילי + קיבולי, מופעל אלקטרוסטטית, המחובר בצורה היברידית לקו תמסורת קו-פלנרי. אופן החיבור ההיברידי ומבנה המתג, מאפשרים בחינה של תהליך אריזת הרכיב כשלב אינטגרלי בתהליך ההרכבה. צורת מימוש זאת תיבחן אל מול תהליך האריזה הייעודי (המבוצע כתהליך אריזה נוסף) במסגרת ייצור מתג סטנדרטי בטכנולוגיות שכבות דקות.

הסעיפים הבאים בפרק זה עוסקים, כפי שתואר לעיל, בתכן ומימוש קו התמסורת והרכיב, תהליך ההרכבה ומערכות המדידה.

3.2 קו התמסורת הקו-פלנרי (CPW)

בכדי לממש קו תמסורת קו פלנרי, נבחנו סוגי מצעים שונים – סוג המצע משליך בעיקר על ההפסדים ועל דיוק התהליך.

לאחר שנסקרו מספר אפשרויות (אלומינה, סיליקון עם ציפוי High Resistivity Silicon, Polyimide) נמצא כי המימוש על מצע סיליקון בעל התנגדות גבוהה הינו הנוח ביותר מבחינת זמינות חומר הגלם וההתאמה לתהליכי ייצור, כאשר ההפסדים הצפויים בו הם נמוכים יחסית ומסדר גודל של $0.8-0.9 \text{ db/cm}$ ¹⁸ לסיליקון בעל התנגדות של $5000 \Omega\text{cm}$.

בתכנון הקו הוגדרו שני אזורים, הראשון הינו אזור המגעים – קו התמסורת חייב להתחיל (ולהסתיים) במגעים המתאימים לפרובים (Probes) של מערכת המדידה והאזור השני הינו הקו עצמו בו מתוכננת עכבה אחידה של 50 אוהם (בכדי לפשט תהליכי כיוול ומדידה).

3.2.1 חישוב פרמטרי הקו ותכן גיאומטרי

בקו תמסורת כללי, נקבעת העכבה ע"י המשתנים הבאים, בהתאם לגיאומטריה והרכב החומרים (מוליכים ומבדדים):

R - ההתנגדות האוהמית הקווית של מוליכי הקו ליח' אורך (Ohm/m)

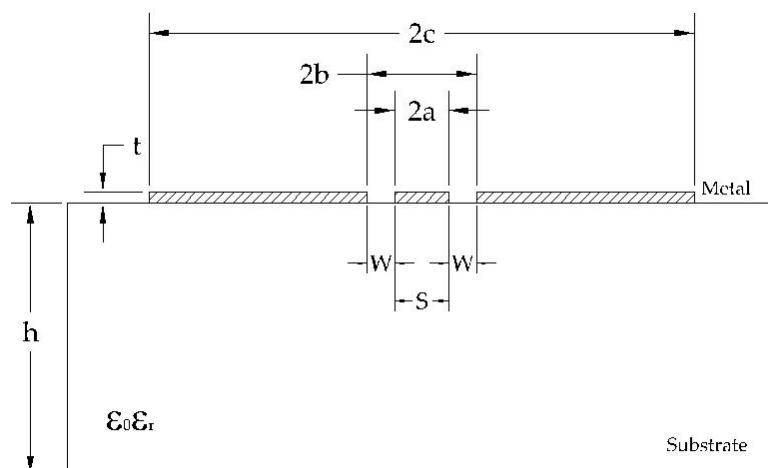
C - הקיבול בין שני המוליכים ליח' אורך (F/m)

L - ההשראות בין הקווים ליח' אורך (H/m)

G - מוליכות חומר המבדד בין הקווים ליח' אורך (mho/m)

והעכבה נקבעת ע"י הנוסחה הבאה:

$$16 \quad Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$



תרשים 14 – חתך של קו תמסורת קו-פלנרי

Figure 12 – Coplanar Waveguide cross section

בכדי לתכנן את קו התמסורת הקו- פלנרי, נעשה שימוש בקירוב אנליטי המבוסס על שיטת Conformal mapping, החישוב מתבסס על הנחת אופיין התפשטות TEM קוואזיסטטי ורמת הטעות ביחס למדידות וסימולציות נומריות נמוכה (מספר אחוזים)¹⁸.

על פי הגדלים הגיאומטריים בתרשים מספר 14 :

א. רוחב קו הסיגנל (2a) או (S).

ב. רוחב המרווח בין הסיגנל לאדמה (W)

ג. המרחק בין האדמות (2b)

ד. רוחב הקו כולו (2c)

ה. עובי המתכות (t)

ו. עובי הדיאלקטריקן (h)

ז. מקדם דיאלקטרי של המצע ϵ_r .

ניתן לחשב את העכבה (Z_0), מהירות פאזה (v_{ph}) ואת המקדם הדיאלקטרי האפקטיבי (ϵ_{eff}).

בקו תמסורת המתאים למתג יש להתחשב בהשפעת הרוחב הסופי של משטחי האדמה ובעובי הסופי של המצע.

המשוואות הרלוונטיות למקרה זה הינן :

$$17 \quad \epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0}$$

$$18 \quad v_{ph} = \frac{c'}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$$19 \quad Z_0 = \frac{1}{C v_{ph}}$$

כאשר c' הינה מהירות האור בוואקום, C הקיבול ליח' אורך של הקו, ו- C_0 קיבול הקו בהעדר שכבות דיאלקטריות.

$$20 \quad \epsilon_{eff}^{cpw} = 1 + \frac{1}{2}(\epsilon_r - 1) \frac{K(k)K(k_1')}{K(k')K(k_1)} = 1 + q(\epsilon_r - 1)$$

(משתנה העזר q מוגדר כפקטור מילוי)

$$21 \quad Z_0^{cpw} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}^{cpw}}} \frac{K(k)}{K(k')} [\Omega]$$

$$k = \frac{c}{b} \sqrt{\frac{b^2 - a^2}{c^2 - a^2}}$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2}}$$

$$^{22} k_1 = \frac{\sinh(\pi c/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \sqrt{\frac{\sinh^2(\pi b/2h) - \sinh^2(\pi a/2h)}{\sinh^2(\pi c/2h) - \sinh^2(\pi a/2h)}}$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \sqrt{\frac{\sinh^2(\pi c/2h) - \sinh^2(\pi b/2h)}{\sinh^2(\pi c/2h) - \sinh^2(\pi a/2h)}}$$

האופרנד K הינו אינטגרל אליפטי מלא מסוג ראשון. בכדי לפתור את האינטגרל ניתן להפעיל שיטה איטרטיבית¹⁹ עד להתכנסות החישוב.

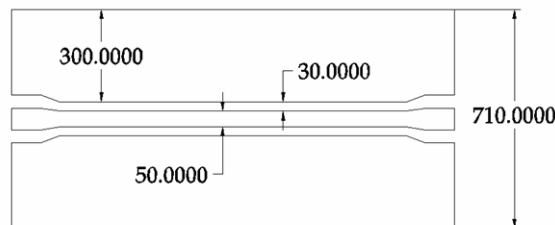
מידול קו התמסורת בוצע בעזרת תוכנת Matlab תוך שימוש בפרמטרי החומר הבאים :

- מקדם דיאלקטרי של הסיליקון : $\epsilon_r = 11.9$,
- סיליקון בעל התנגדות גבוהה – High Resistivity Silicon (HR)
- עובי המצע : 1000 מיקרון = 1 מ"מ
- עובי המתכת - 2 מיקרון (זהב)

על פי פרמטרים אלו התכנס התכן לנתונים הבאים :

- רוחב קו סיגנל – 50 מיקרון.
- מרווח סיגנל לאדמה – 30 מיקרון.
- רוחב כל קו אדמה – 300 מיקרון.

כשהאימפדנס המתקבל מהחישובים הינו 50.3 אוהם והמקדם הדיאלקטרי האופייני של קו התמסורת הוא 6.45.



תרשים 15 - מימדי קו תמסורת

Figure 13 - CPW Dimensions

מידול קו התמסורת כולל גם את חישובי ההפסדים ליח' אורך. על בסיס הפסדים אלו ניתן להשוות בין מדידות S-parameters של קו ללא מתג לתכן, ולהחסיר מההפסדים של קו עליו מורכב מתג. המשוואות האנליטיות למידול הפסדי הקו, מכילות מספר רכיבים. באופן כללי הפסדי קו התמסורת נובעים מההפסדים במוליכים, בדיאלקטריקון, הפסדי קרינה והפסדי זליגה. בקווי תמסורת רציפים, ובמצעים בעלי התנגדות גבוהה ניתן להזניח את האחרונים ולהניח שההפסדים נובעים מהמצע ומהמוליכים:

$$23 \quad \alpha_T^{CPW} = \alpha_d + \alpha_c \quad [\text{db/m}]$$

ההפסדים הנובעים מהמצע הדיאלקטרי ניתנים ע"י:

$$24 \quad \alpha_d = 8.686 \cdot \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{\epsilon_r}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} q \tan \delta_e \quad [\text{db/m}]$$

כאשר λ_0 הינו אורך הגל באוויר (במטרים), $\tan \delta_e$ - קבוע ההפסדים הדיאלקטרי של המצע, ϵ_r הקבוע הדיאלקטרי היחסי של המצע, q גורם המילוי (Filling factor) ו- ϵ_{eff} נתון ע"י משוואה 20 לעיל.

ההפסדים הנובעים מהמוליכים ניתנים ע"י המשוואות שלהלן, אלו מקורבות (תחת ההנחה שעובי הקווים גדול מאפקט השפה) ומאפשרות חישוב ההפסדים ליח' אורך.

$$25 \quad \alpha_c = \frac{R_c + R_g}{2Z_0} \quad [\text{db/m}]$$

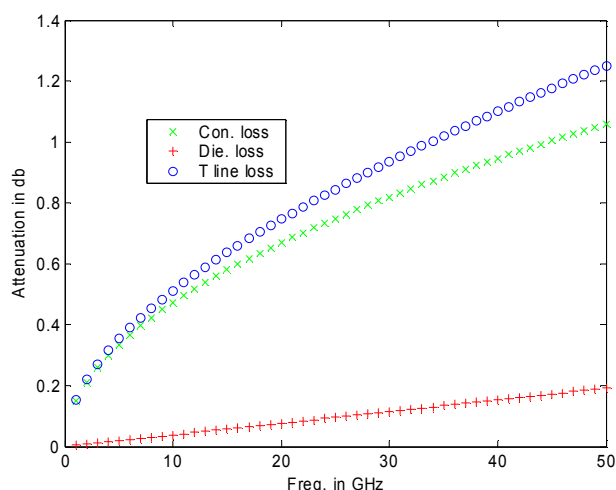
כאשר Z_0 הינו אימפדנס הקו הנתון ע"י משוואה 21 ו- R_c ו- R_g מייצגים את ההתנגדות הטורית ליח' אורך של המוליך המרכזי (c) ושל מישורי האדמה (g) בהתאמה.

$$26 \quad \begin{aligned} R_c &= \frac{R_s}{4S(1-k_0^2)K^2(k_0)} \left[\pi + \ln \left(\frac{4\pi S}{t} \right) - k_0 \ln \left(\frac{1+k_0}{1-k_0} \right) \right] \\ R_g &= \frac{k_0 R_s}{4S(1-k_0^2)K^2(k_0)} \left[\pi + \ln \left(\frac{4\pi(S+2W)}{t} \right) - \frac{1}{k_0} \ln \left(\frac{1+k_0}{1-k_0} \right) \right] \end{aligned}$$

שני הביטויים הנ"ל תלויים בהתנגדות השפה R_s הנובעת מאפקט השפה בתדרים גבוהים: אפקט שפה – מגדיר את עומק החדירה של האות למתכת/ שטח חתך המוליך האפקטיבי.

$$27 \quad R_s = \frac{1}{\delta \sigma} \quad [\text{Ohm}]$$

$$28 \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega(\mu_0 \mu_r) \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad [\text{m}]$$



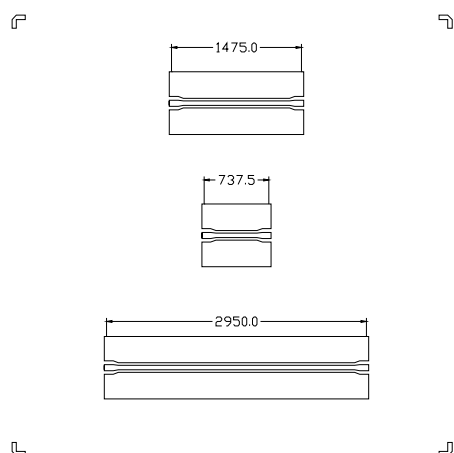
בתדרים של בין 1 גה"צ ל- 50 גה"צ, במוליכי זהב עומק אפקט השפה נע בין 2.3 מיקרון לכ- 0.33 מיקרון.

ההפסדים על קו תמסורת באורך של כ- 3 מ"מ מגיעים עד כדי 1.2db בתדר של כ- 50 גה"צ, על גבי מצע של סיליקון בעל התנגדות גבוהה (מעל 2000 אוהם ס"מ). על פי הסימולציה נראה כי ההפסדים בקו (המורכבים בעיקר מהפסדי המוליכים) יאפשרו הרכבת מתג ומדידתו.

תרשים 16 – הפסד צפוי בקו התמסורת באורך 3 מ"מ

Figure 14 – 3mm long CPW expected loss

תכנון למדידה:



בכדי להימנע מאריזת הרכיב במארז, הוגדרו קווי התמסורת (והרכיבים) כך שניתן יהיה למדוד אותם, לפני ההרכבה ההיברידית ואחריה, ישירות מפני ה-Wafer. בקצוות הקו הוגדרו פדים המותאמים לפרובי הבדיקה (מרווח של כ- 150 מיקרון בין מגע למגע) ובעלי אזור התכנסות לגיאומטריה סופית, עפ"י כללי התכנון המקובלים בתחום.

תרשים 17 – דגם כיול למדידת קו תמסורת

Figure 15 – CPW Measurements Calibration die

בהתאם לפרוצדורת כיול, על גבי הפיסה הוגדרו רכיבים המכילים שלושה אורכי קו תמסורת. המעבר בין המגעים לקו התמסורת המתוכנן זהה, אורך קווי התמסורת (ללא המגעים) מותאם לתהליך כיול (De-Embedding) עפ"י היחסים הבאים:

אורך כללי	מרחק בין קצה מגע לקצה קו	אורך בין מגעים	יחס
1525	25 מיקרון	1475	2L
787.5	25 מיקרון	737.5	L
3000	25 מיקרון	2950	4

טבלה 6 – מימדי קווים לכיול

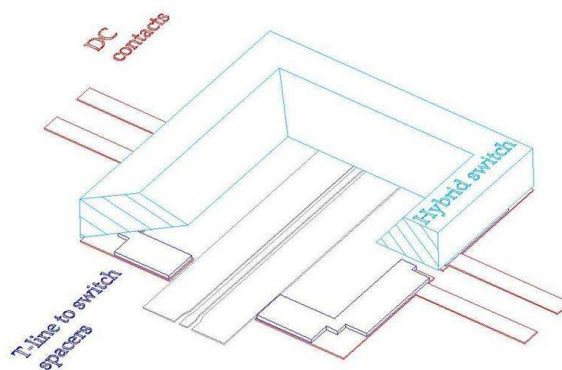
Table 6 – calibration cpw's length

כ- 6 רכיבים מסוג זה (לצורך קליברציה) שולבו במסכה הכללית במקומות שונים ע"ג ה- wafer בכדי לאפשר כיול המערכות לפני המדידות עצמן.

תכנון לאינטגרציה:

עפ"י מבנה המתג המתוכנן ושיטת החיבור (FCB) הוגדר מראש גודל הרכיב המינימאלי שיתמוך במתג (2.3x2.3 מ"מ). מימדים אלו הוגדרו לשם התאמה למערכת המיקום הקיימת. מארז קטן יותר אפשרי (המתג מהווה אחוז קטן מהשטח) אך התהליכים (ניסור, ניקוי, חיבור) בעייתיים ככל שהמסגרת המכנית קטנה יותר.

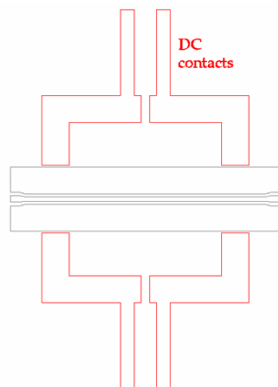
בעת חיבור המארז למצע יש לשמור על מרווח בינו לקו התמסורת וכן לאפשר מגע חשמלי למתח ישר לטובת ההפעלה האלקטרוסטטית, בתצורה הבאה:



תרשים 18 – ארכיטקטורת חיבור היברידית

Figure 16 – Hybrid assembly architecture

המרווחים יושמו ע"י שכבת אלומיניום מנודף, בעובי של כ- 5 מיקרון. המבנה המתואר בתרשים 18 הגדיר את סט מסכות הבסיס (תרשים 19), כך שקו התמסורת במרכז, ומשני צידיו משטחי מגע מוליכים, התומכים הן במרווחים והן במגע חשמלי מפני שטח הפיסה אל המתג המזווד לצורך ההפעלה החשמלית.



תרשים 19 – מסכת שכבת קו תמסורת – שכבת מוליכים.

Figure 17 – CPW first Conductors mask

3.2.2 מימוש קו התמסורת

כמצע, נבחר סיליקון בעל התנגדות גבוהה (High Resistivity Silicon) בעובי של 1000 מיקרון. השימוש בסיליקון מאפשר מצד אחד שימוש בכל התהליכים הסטנדרטיים בתחום המיקרו אלקטרוניקה ושימוש במסכות בעלות דיוק גבוה (דיוק של $\pm 2\mu$ בליטוגרפיה).

פרמטרי המצע שנבחר: עובי – 1 מ"מ, התנגדות – גדולה מ-2500 אוהם ס"מ, $\epsilon_r=11.9$, $\tan \delta_e = 0.006$, פני שטח מלוטשים, קוטר 100 מ"מ.

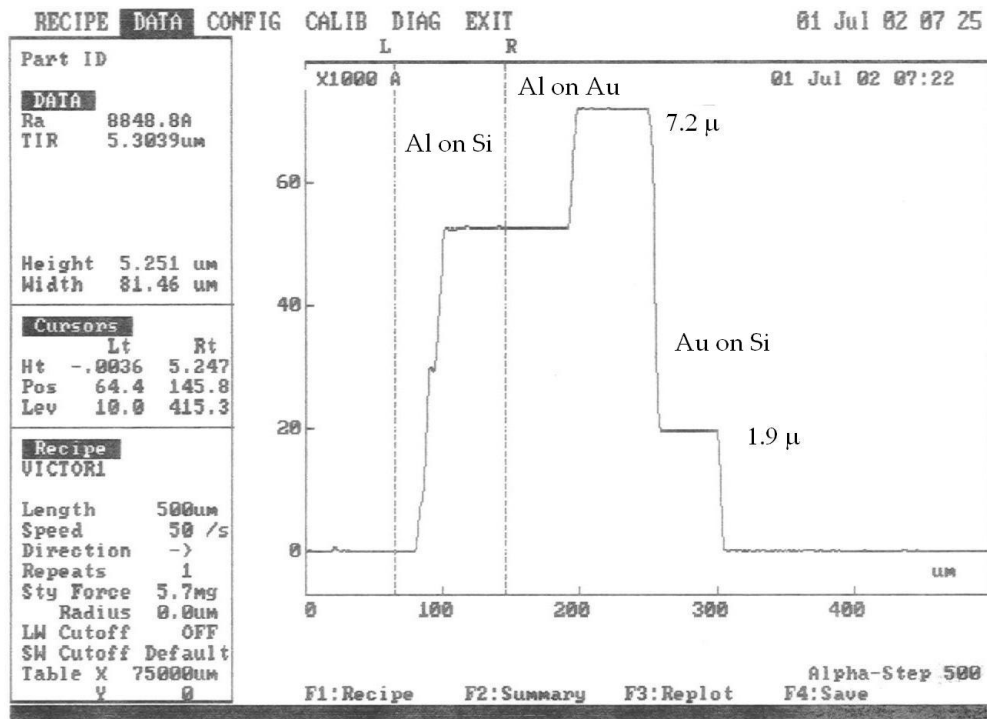
תהליך מימוש קווי התמסורת:

#	תיאור תהליך	הערות
1	ניקוי RCA וחמצון תרמי של מצעים – תחמוצת בעובי סופי של $1000 \text{ \AA}$.	
2	ליטוגרפיה בפוטו רזיסט חיובי עבה (AZ4562) בעובי של 10 מיקרון	מסכה 1 - מסכת שכבת מוליך
3	ביצוע תהליך Descum לניקוי פני שטח לפני נידוף.	
4	נידוף (E-Beam) של שכבות כרום וזהב $300 \text{ \AA} \text{ Cr}/20000 \text{ \AA} \text{ Au}$	
5	ביצוע תהליך Lift Off – להגדרת מוליכים ומדידת מרווחים	
6	ליטוגרפיה בפוטו רזיסט חיובי עבה (AZ4562) בעובי של 10 מיקרון	מסכה 2 – מסכת מרווחים (Spacers)
7	ביצוע תהליך Descum לניקוי פני שטח לפני נידוף.	
8	נידוף (E-Beam) של אלומיניום בעובי של 4 מיקרון	
9	ביצוע תהליך Lift Off – ומדידת עובי	
10	ניסור וניקוי סופי	

טבלה 7 – תהליך מימוש קווי תמסורת

Table 7 – CPW die fabrication process

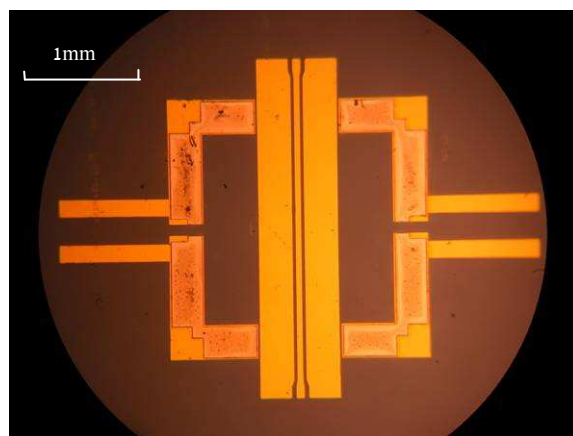
מידות עובי השכבות בוצעו ע"י פרופילומטר טרם ביצוע הניסור. המדידה בוצעה במיקום ייעודי כך שבמידה אחת ניתן להבחין בעובי המוליך, עובי המרווח והעובי הכללי, שכבה ע"ג שכבה. משטח הייחוס הינו פני השטח של הסיליקון:



תמונה 4 – מדידת עובי שכבות קו התמסורת והמרווח

Picture 4 – CPW layer thickness and spacer measurement

בתמונה הבאה מצולם שבב בודד, לאחר ניסור, המכיל קו תמסורת, ארבעה מגעים לחיבור מתח ישר למתג ומרווחי אלומיניום לתמיכת מסגרת המתג.



תמונה 5 – שבב קו תמסורת, לפני חיבור מתג

Picture 5 – CPW die before Switch assembly

3.3 עקרונות המבנה של המתג ההיברידי

המבנה המרחבי של המתג מגדיר את הפרמטרים האלקטרו-מכניים כמו גם את הפרמטרים בתדר גבוה של המתג.

כפי שצוין לעיל, הפרמטר העיקרי הקשור לביצועים האלקטרו-מכניים של המתג הינו מתח הסף להפעלה, כאשר הדרישה הינה להקטינו לתחום הקטן מ- 60 וולט. מתח זה (בהנחת מבנה של פלטות מקבילות) תלוי במספר פרמטרים גיאומטריים עפ"י הנוסחה הבאה :

$$V_p = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 W's}} g_0^3 \text{ [Volt]} \quad 29$$

ממשוואה זו ברור כי :

- הקטנת k (קבוע הקפיץ המכני) ו- g_0 (המרווח בין האלקטרודות במצב Off) יקטינו את מתח הסף.
- הגדלת שטח האלקטרודות ($W's$) יקטין גם הוא את מתח הסף.

למרות הנ"ל :

- כשמתחשבים גם בדרישות הביצועים לתדר גבוה מתברר כי לא ניתן להקטין את g_0 מתחת לכ- 3~ מיקרון, בשל ההשפעה השלילית של המתג על ה- Insertion Loss, כמשטח אדמה נוסף המשבש את פרמטרי קו התמסורת (שינוי בקיבול הקו).
- קבוע קפיץ קטן מידי בעייתי גם הוא בהיבט אמינות הרכיב ובהקשר למהירות המיתוג שלו :
 - קבוע קפיץ קטן = כוח מחזיר קטן, קטנה היכולת להתמודד עם שינויים בפני שטח המגע במתג הנובעות מתופעות של טעינת דיאלקטריקן, שיתוך או Stiction - התוצאה היא בד"כ הקטנת אורך החיים של הרכיב.
 - המיתוג On→Off מתבסס על איפוס המתח החשמלי וחזרה למצב Off רק על בסיס כוח הקפיץ המכני בתנועה חופשית. במידה וקטן קבוע הקפיץ, קטנה גם התדירות העצמית וזמן המיתוג מתארך.
- הגדלת שטח האלקטרודות טומנת בחובה גם הפרעה לקו התמסורת וגם הגדלת מסת המתג = האטה במהירויות המיתוג.

בנוסף ל"Trade Off" בפרמטרים גיאומטריים אלו, עולים גם שיקולים נוספים במסגרת התכן, כמו למשל :

- אחידות ושליטה בפרמטרי החומר המרכיב את המתג.
- נושא עמידות הרכיב בהספקים ופיזור חום.
- הקטנת השפעת ההספק העובר על תופעת המיתוג העצמי.
- סוגיית האריזה

לאחר בחינת המימושים האופייניים ובחינת המימוש ע"י חיבור היברידי נמצאו מספר כיווני פתרון מקוריים שאינם אפשריים למימוש ע"י טכנולוגית שכבות דקות :
א. מימוש גוף המתג מסיליקון גבישי :

- הפרדת משתנים בין חלק המתג הנדרש לביצועים מכניים (ואלקטרו מכניים) טובים וחלק המתג המספק את דרישות התדר הגבוה.

- גישה זו מבטלת את השפעת המאמצים השווריים הקיימים בעת נידוף/שיקוע השכבות הדקות (בד"כ משמשות גם להולכה וגם כמבנה המכני).

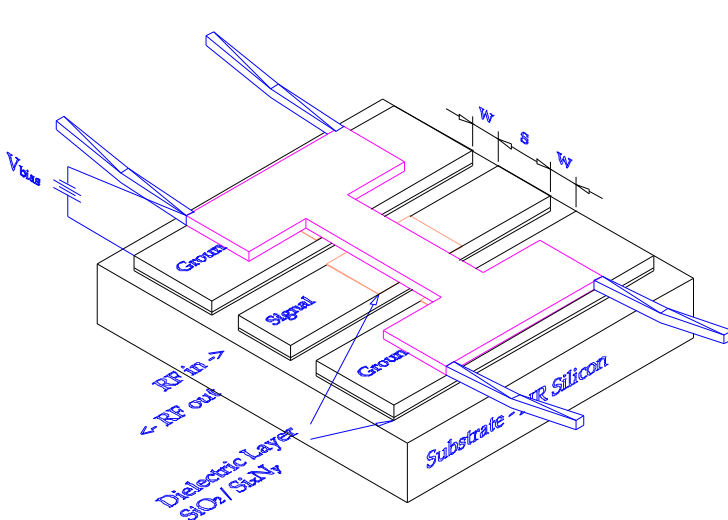
- השימוש בסיליקון גבישי מאפשר מימוש מבנה מכני עמיד המסוגל לתמוך בשכבות אחרות , כמו למשל מבדד בעל קבוע דיאלקטרי גבוה ע"ג המתג ולא ע"ג קו התמסורת – מגדיל את גמישות התכן וחיבור המתג לקו תמסורת סטנדרטי.

- קיבול ומעבר חום טוב יותר ע"י הסיליקון הגבישי. המתג מסיבי יותר מהקיים במימושים בעזרת שכבות דקות בלבד.

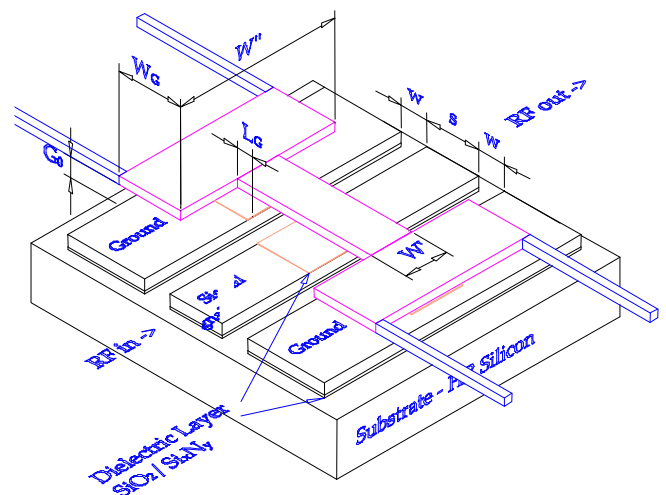
ב. הפרדה בין אלקטרוטודות ההפעלה האלקטרוסטטיות לאלקטרוטודות היוצרות את המשטח הקיבולי הנדרש למיתוג קו התמסורת – הקטנת תהליכי ההתיישנות בממשק מתכת/מבדד והקטנת הסיכון להפעלה עצמית.

ג. שימוש במצע מסוג SOI מאפשר את היישום ע"י סיליקון גבישי וכן מספק מארז אטום בעת החיבור ההיברידי.

צורת המימוש העקרונית מודגמת בתרשים הבא כאשר מתח ההפעלה מופעל בין משטחי האדמה למתג. במצב Off – הכוח האלקטרוסטטי הנובע מאות ה- RF (תוצאה של אופי הכוח התלוי ב- V^2) נבנה רק בין קו האות (Signal) ואזור המתג שמעליו (בחלק הצר). לפיכך שטח האלקטרוטודות קטן מהנדרש לשם ההנעה האלקטרוסטטית ולכן קטן הסיכון להפעלה עצמית.



תרשים 21 – מתג היברידי – מצב פעיל
Figure 18 – Hybrid switch – On state



תרשים 20 – מתג היברידי, מצב לא פעיל
Figure 19 – Hybrid switch – Off state

3.4 תכנ המתג ההיברידי

כדי לממש את המתג עפ"י עקרונות התכנ שלעיל, נבחר מצע סיליקון בתצורת SOI (Silicon on Insulator):

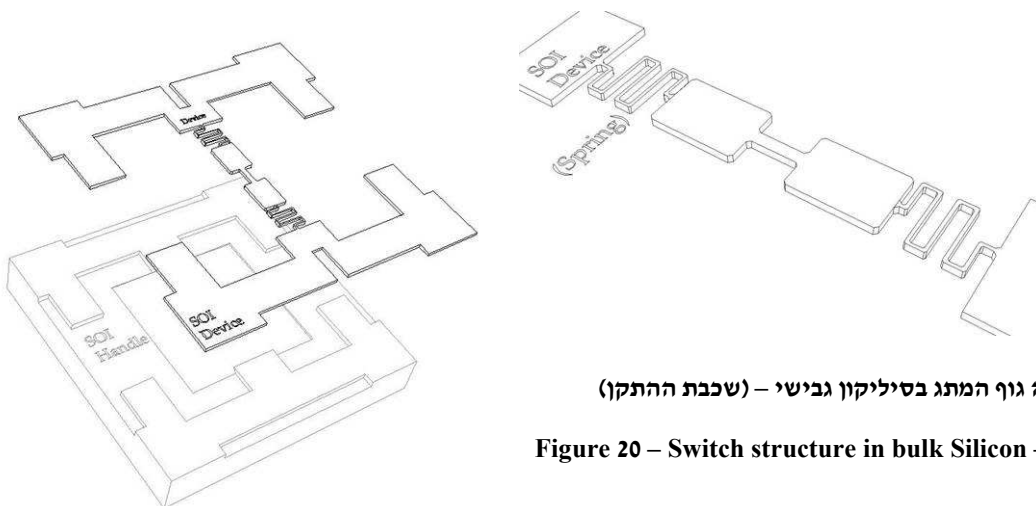
- עובי מצע – 500 מיקרון:
- עובי שכבת ההתקן (Device layer) 10 מיקרון.
- עובי שכבת תמיכה (Handle layer) 490 מיקרון.
- עובי תחמוצת (SiO_2) בין השכבות – $1000 \text{ \AA}$.

מצע זה מאפשר:

- שימוש בשכבת ההתקן האחידה בעובייה ובתכונותיה המכניות, למימוש האלמנט המכני במתג.
- השימוש במצע SOI מאפשר לבצע תהליכים משני צדדי המצע תוך שימוש בתחמוצת כחסם איכול וכשכבת הקרבה (Sacrificial layer) לשחרור סופי של ההתקן, בדומה לתפקיד שכבת ההקרבה ברכיבים המבוססים על שכבות דקות.
- שימוש בשכבת המצע לתמיכה מכנית למתג, כממשק למערכת החיבור וכמארז בעתיד.
- בידוד חשמלי מעולה ($\sim 2000 \text{ \AA}$) בין משטחים שונים בשכבת התקן.
- מימוש שכבת מוליך לצורך חשמלי בלבד – ללא השפעה מכנית.

3.4.1 תכנ המבנה הגיאומטרי

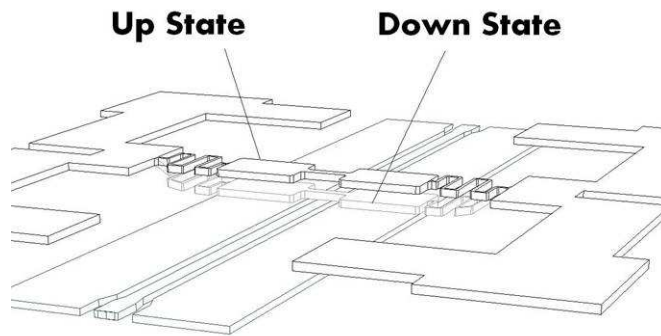
המתג ממומש מפלטה מרכזית קשיחה (בעובי שכבת ההתקן בחומר הגלם) ובצורה של "שעון חולי". מבנה זה מגדיר (לאחר החיבור) שני משטחים רחבים מעל משטחי האדמה של קו התמסורת, המשמשים כאלקטרודות ההפעלה. החיבור הצר ביניהם מהווה את אלמנט המיתוג בקו התמסורת, רוחבו מספק לשם קבלת בידוד (Isolation) נדרש, אך אינו רחב מדי בכדי להשפיע על אופיין קו התמסורת כמשטח אדמה עליון. הפלטה רתומה ע"י שני קפיצי עלה נחשיים (Meander) למסגרת. מבנה המסגרת כולל משטחי סיליקון משכבת ההתקן המחוברים לשכבת התמיכה ויוצרים תנאי שפה "רתום – רתום" לגוף המתג הנע (תרשים 22).



תרשים 22 – מבנה גוף המתג בסיליקון גבישי – (שכבת ההתקן)

Figure 20 – Switch structure in bulk Silicon – (SOI's device layer)

כאשר מופעל מתח (גדול ממתח הסף) בין המתג (שכבת ההתקן) למשטחי האדמה בקו התמסורת, נוצר כוח אלקטרוסטטי הגורם לתופעת ה-Pull In ומצמיד את הפלטה לקו התמסורת כמתואר בתרשים 23.



תרשים 23 – תנועת גוף המתג בעת הפעלת מתח סף

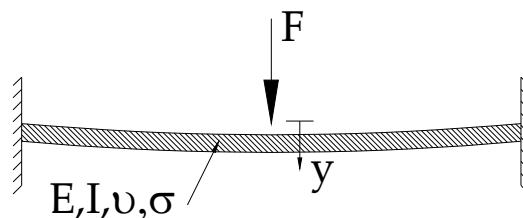
Figure 21 – Switch plate movement when pulled in

בכדי לחשב את הפרמטרים המכניים של המתג יש למדל תחילה את קבוע הקפיץ של המבנה ביחס לאופן (Mode) תנועה זה. קבוע הקפיץ הינו אחד הפרמטרים החשובים, המשפיע ישירות על המאפיינים המכניים של המתג. מתח ההפעלה, וזמן המיתוג תלויים ישירות בפרמטר זה ומכאן חשיבותו בתכן הכולל.

3.4.1.1 חישוב קבוע קפיץ

קבוע הקפיץ תלוי הן במבנה הגיאומטרי והן בתכונות האלסטיות של חומר המבנה של הקפיץ. מודלים קיימים מתארים קבוע קפיץ של קורה אלסטית עפ"י מספר פרמטרים:

- א. תכונות החומר כמו אלסטיות, מאמצים שיוריים ומקדם פואסון.
 - ב. תנאי השפה של הקורה (רתום-רתום במקרה זה)
 - ג. המבנה הכללי של הקורה ומומנט האינרציה (הנקבע עפ"י צורת החתך)
 - ד. אופן הפעלת הכוח החיצוני (מרוכז, מפולג ומיקום)
- מבנה אופייני של מתג הממומש בטכנולוגית שכבות דקות מיוצג ע"י קורה בעלת תנאי שפה "רתום-רתום" עליה מופעל כוח מרוכז, במרכזה, מתואר בתרשים הבא:



תרשים 24 – הגדרת גיאומטריה של קורה רתומה-רתומה.

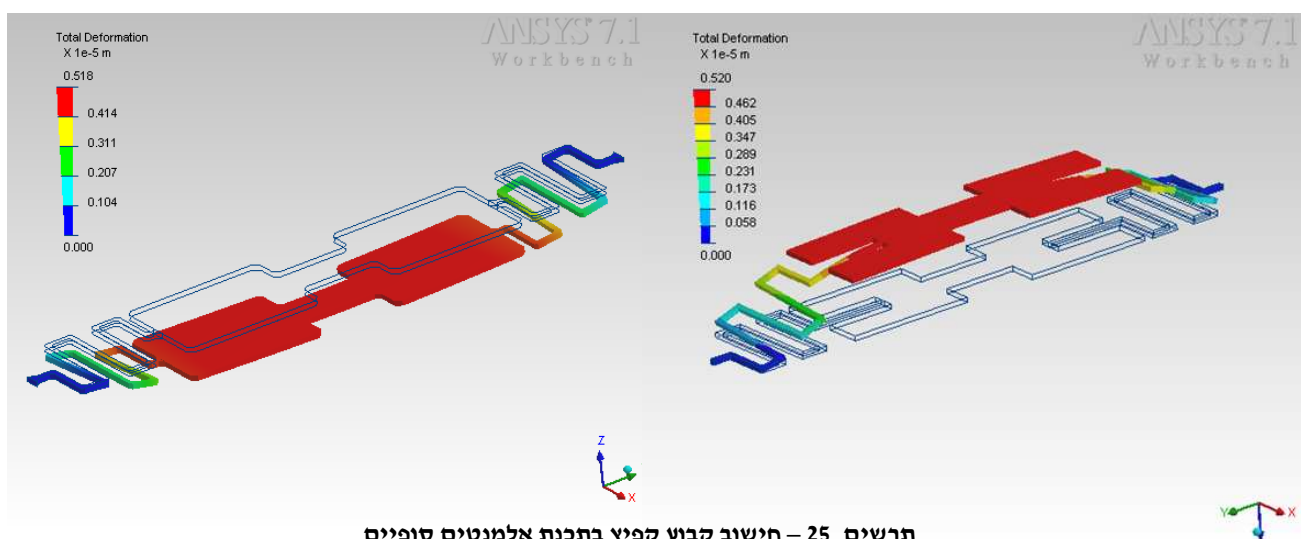
Figure 22 – Clamped-clamped beam geometry

קבוע קפיץ של מבנה פשוט כמתואר לעיל נקבע ע"י משוואה 30 המתבססת על הקבוע האלסטי של חומר המבנה (E-Young Modulus), פרמטרים גיאומטריים כעובי הגשר (t) אורכו (L) ורוחבו (W'), מאמצים שיוריים בחומר (σ) ומקדם פואסון (ν):

$$k = \frac{32Et^3W'}{L^3} + \frac{8\sigma(1-\nu)tW'}{L} \quad [\text{N/m}]$$

לקבוע הקפיץ רגישות גבוהה לפרמטרים מכניים הקשורים לחומר המבנה ולתהליכי הייצור ומכאן ששינויים קלים בתהליך בניית הגשר (אפילו ע"ג אותה פיסה (Wafer) מתבטאים בשינויים גדולים מאוד בערכי מתח ההפעלה. השימוש בחומר גבישי כסיליקון שאינו כולל מאמצים שיוריים, והדירות הפרמטרים ברמת חומר הגלם מאפשר "עקיפה" של בעיית השונות הנובעת ממבנים הבנויים משכבות דקות.

במבנה המוצע קיימים שני קפיצים - אחד מכל צד של גוף המתג. קבוע הקפיץ הכולל מורכב מחיבור טורי של שני קבועי הקפיץ והכוח האלקטרוסטטי הפועל על גוף המתג בלבד, מופיע ככוח מפולג על פני שטח האלקטרודות הרחבות. בסוג מבנה זה ניתן להזניח את הכפיפה והפיתול בפלטה ביחס לקפיצים (יחס מומנט אינרציה – 1:20) וכן, מכיוון שנעשה שימוש בחומר הומוגני שתכונותיו ידועות, האיבר המייצג מאמצים שיוריים פנימיים אינו קיים. ניתן לבצע חישוב אנליטי של מבנה זה בהתבסס על סיכום השפעת הכפיפה והפיתול בכל אבר של הקפיץ המפותל²⁰. לאחר מספר חישובים אנליטיים ראשוניים, הוגדרו מספר מבני מתג, כמתואר בתרשים 25, ובוצעו חישובים כוללים בתכנת אלמנטים סופיים²¹.



תרשים 25 – חישוב קבוע קפיץ בתכנת אלמנטים סופיים

Figure 23 –FEM analysis of spring constant

בהתאם לשני אורכי קפיץ (2.06 מ"מ ו- 2.36 מ"מ) שנבנו במסכות, התקבלו הקבועים הבאים: $k_1 \sim 21 \text{ N/m}$ למבנה בעל הקפיצים הקצרים ו- $k_2 \sim 14 \text{ N/m}$ למבנה בעל הקפיצים המוארכים. בדיקת המאמצים המרביים, בתנועה של עד 6 מיקרון, העלתה שהם אינם מתקרבים לסף האלסטי והסיכון לשבר מכני ו/או לאפקט התעיפות קטן. במסגרת הסימולציות נבדקה גם ליניאריות הקפיץ, שנשמרה גם בהפעלת כוח גדול עד לתזוזות של מספר עשרות מיקרונים.

על פי קבועי הקפיץ ובהזנחת מסת הקפיצים, חישוב מסת הפלטה מאפשרת חישוב אנליטי מקורב של התדר העצמי של ההתקן כולו :

$$Area = 107.6E3 \text{ to } 120.3E3 [\mu^2]$$

$$31 \quad \rho = 2.331E^{-15} [\text{Kg}/\mu^3]$$

$$t = 10 \mu$$

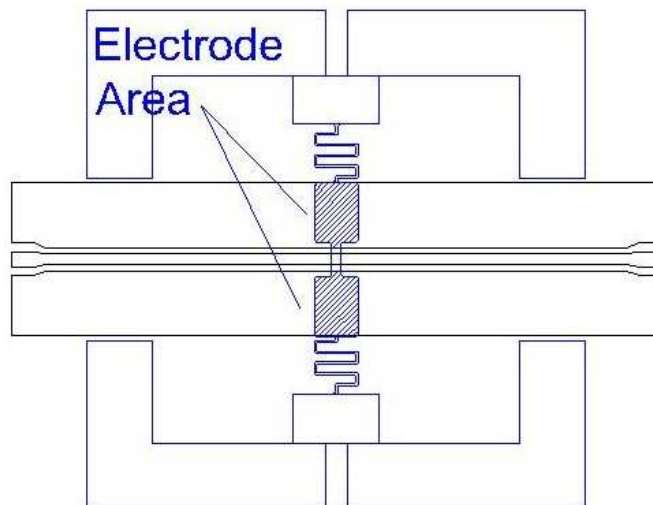
$$M = \rho t Area \cong 2.65 \times 10^{-9} [\text{Kg}]$$

$$32 \quad f_{0s} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{18}{2.6 \times 10^{-9}}} \cong 13 \text{ kHz}$$

ביצוע חישוב זה בסימולציות אלמנטים סופיים מראה תדר עצמי ראשון בערכים דומים במוד התנועה הרצוי, בתדרים בין 11.5KHz ל- 13.5KHz, בהתאם לקשיחות הקפיצים ומסת המבנה כולו- הפעם כולל מסת הקפיצים.

3.4.1.2 חישוב מתח סף להפעלה

לצורך חישוב המתח ניתן להשתמש במודל הרגיל לפלטות מקבילות, כפי שתואר בנוסחה 15 לעיל. שטח האלקטרודות המשמש ליצירת הכוח האלקטרוסטטי מוגדר בתרשים 26 והמרווח בין אלקטרודות אלו מוגדר ע"י עובי מרווחי האלומיניום המנודפים ע"ג קו התמסורת – כ- 5 מיקרון.



תרשים 26 – שטח אלקטרודות להפעלה אלקטרוסטטית

Figure 24 – Electrostatic actuation electrode area

- א. שטח האלקטרודות האפקטיבי מורכב משטחי הפלטה המרכזית הנמצאים ישירות מעל משטחי האדמה של קו התמסורת.
- ב. המרווח בין המתג לקו התמסורת משפיע על שני גורמים עיקריים:
 - Insertion loss במצב Off – ככל שהמתג רחוק (גבוה) יותר כך קטנה השפעתו על קו התמסורת.
 - מתח ההפעלה – ככל שהמתג רחוק יותר כך גדל מתח ההפעלה.

ביצוע סימולציות תדר גבוה מראות כי במרווח של 5 מיקרון (g_0) ההשפעה של גוף המתג על עכבת קו התמסורת זניחה, ועדיין מתקבל מהחישובים מתח הפעלה נמוך דיו:

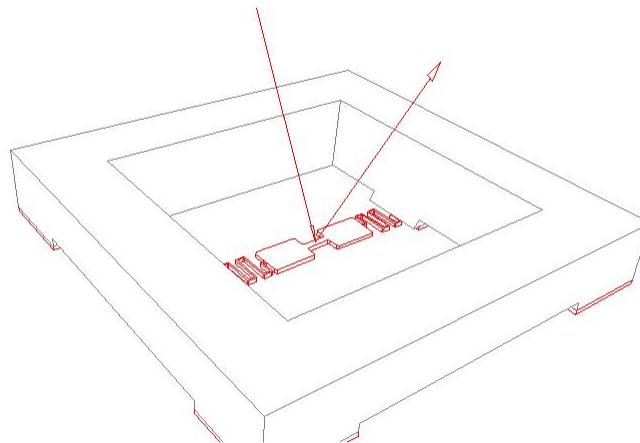
$$A_e \xrightarrow{\text{Electrode plates Area}} 113800 [\mu^2]$$

$$^{33} V_p = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 A_e}} g_0^3 \cong 27 \text{ Vdc}$$

3.4.1.3 תכן מסגרת התמיכה לרכיב

בחירת גודל מסגרת הרכיב מושפע בעיקר מאופי הממשק אל מערכת ההשמה. למערכת החיבור ההיברידי מספר ראשים סטנדרטיים למניפולציה של שבבים, בשל המבנה העדין של המתג נבחרה מסגרת ברוחב של כ- 2.3x2.3 מ"מ, כך שמשטח האחיזה ע"י ואקום של מערכת ההשמה יהיה רחוק מספיק מאזור המתג.

מדידות של הביצועים האלקטרו-מכניים כמו מתח סף למשל, ניתן לבצע ע"י מערכות מדידה חשמליות (ע"י זיהוי שינוי הקיבול בעת ההפעלה). מדידות של פרמטרים מכניים, כמו מהירות המיתוג, מוד התנועה ותדירות עצמית נמדדות ע"י מערכות מדידה המשלבות חישה אופטית. מערכות אלו מסוגלות לאפיין תנועת משטחים בתדרי תנועה ומרחקי תנועה גדולים יחסית. בכדי לאפשר את מדידות אלקטרו-אופטיות ע"י ויברומטר מבוסס לייזר, הוגדר פתח בשכבת המצע כך שהמתג יהיה חשוף בשטחו האחורי כמתואר בתרשים 27.



תרשים 27 – פתח המיועד לחישה אופטית בשכבת המצע

Figure 25 – Opening in Handle Layer for Optical position sensing

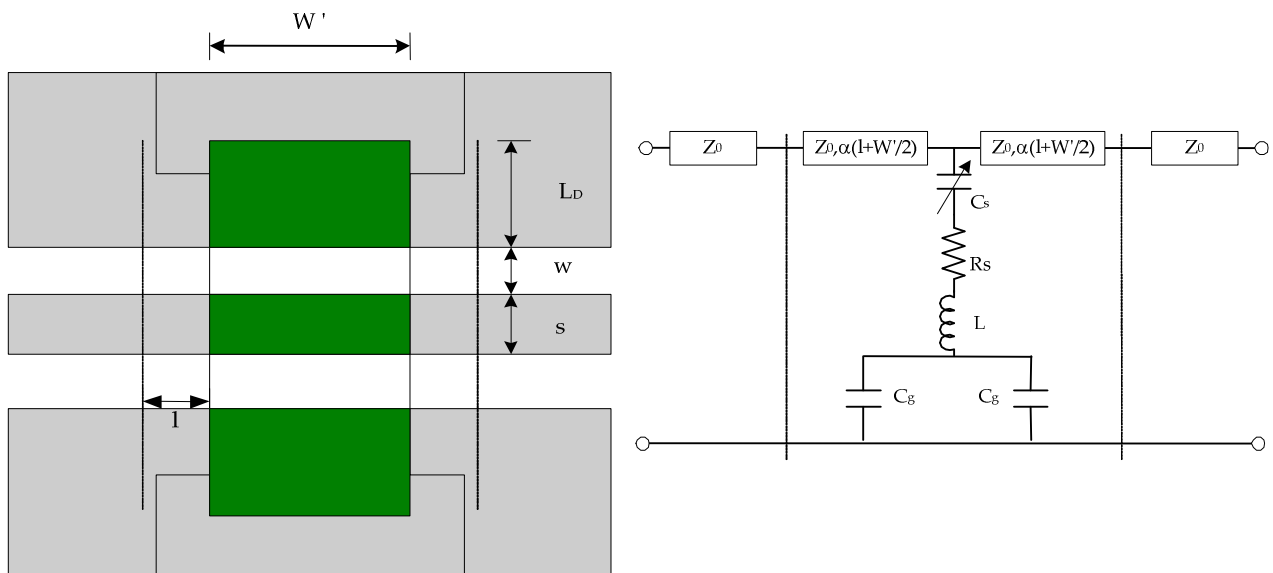
3.4.2 תכן המבנה לתדר גבוה

במקביל לתכן המכני הקובע את מימדי המתג, נבחנו הפרמטרים העיקריים של המתג בתדר גבוה. השלב עקרוני בבדיקת התאמת המתג ליישום, מתבסס על פתרון מודל מקובץ של המבנה כולו, וחשובים אנליטיים מקורבים של אלמנט הקיבול המשתנה. הקיבול המשתנה של המתג בין מצבי הקיצון המכניים, מהווה את עיקר שינוי האימפדנס ועל פיו התכנס התכן.

3.4.2.1 מודל חשמלי מקובץ

היחס בין הקיבולים בשני מצבי הקיצון קובע את ביצועי המתג. קיבול קטן ככל הניתן במצב OFF יביא למינימום השפעה על קו התמסורת וקיבול גדול ככל הניתן במצב ON יביא לאימפדנס הנמוך ביותר בעת ההפעלה ובידוד (Isolation) גבוה של המתג.

כאשר מופעל מתח חשמלי מספק (מעל מתח סף) נוצרים שלושה קבלים, המחוברים ברשת כמתואר בתרשים 29 - בתרשים זה מוגדרים האזורים בהם נוצרים הקבלים ע"י צבע ירוק כהה.



תרשים 28 – מודל מקובץ של המתג.

Figure 26 – Network Circuit

כמתואר במבוא, מכיוון שהגשר מיוצר על גבי קו תמסורת לתדר גבוה ניתן להתייחס אליו כענף מקבילי לעומס ולמדל אותו בדומה לקרוב המקובל למתג Shunt רגיל, אימפדנס המתג נתון ע"י מודל RLC וניתן להציגו על –ידי המשוואה הבאה :

$$34 \quad Z_s = R_s + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{1}{j\omega 2C_g} \quad [\Omega]$$

כאשר C_s ו- C_g הינם הקיבולים בין המתג למשטחי האדמה ובין המתג לקו האות, בהתאמה. משוואה זו מתארת אימפדנס הבנוי כמעגל תהודה, כאשר לא חל שינוי משמעותי בהתנגדות או בהשראות של המבנה ביחס למבנה המתג הסטנדרטי.

השראות המבנה נקבעת בעיקר ע"י הפרמטר (w), כלומר המרווח בין המוליכים בקו התמסורת. במרווח זה עוברת שכבת המוליך במתג ויוצרת מבנה בעל השראות. מתוך הספרות¹ ניתן לצפות כי ההשראות הצפויה הינה בסדר גודל של מספר pH בודדים.

מכיוון שבמבנה זה הקיבול קטן (בהשוואה למבנה מתג Shunt רגיל) בשל חיבור קבלי C_g בטור, כדאי להגדילם גיאומטרית, ככל שניתן, ולעשות שימוש בדיאלקטריקן בעל קבוע דיאלקטרי גבוה ככל שניתן. במקרה זה נעשה שימוש בשכבה מנודפת של טנטלום פנטא-אוקסיד (Ta_2O_5) בעלת קבוע דיאלקטרי של כ- 22-24, עפ"י תוצאות מחקר שבוצע במסגרת המרכז למיקרואלקטרוניקה²².

בהנחת קבל לוחות רגיל ותוך התחשבות בקיבול הנובע משפיית שדה (Fringing Fields) ניתן לרשום את הקיבול הכללי המתקבל במצב בו המתג מורם, במצב Off.

הקיבול המתווסף מ-Fringing Fields, במצב בו המתג מורם מעל קו התמסורת, יכול להגיע לכ- 50% מערך הקיבול הנובע מחישוב משטחים מקבילים בלבד²³.

$$35 \quad C_{signal}^{off} = C_{signal_pp}^{off} + C_{signal_ff}^{off} = \frac{\epsilon_o \cdot A_s}{g + \frac{t_d}{\epsilon_r}} + \frac{2\epsilon_o \sqrt{A_s}}{\pi} + \frac{2\epsilon_o \sqrt{A_s}}{\pi} \ln \left(\frac{2\pi \sqrt{A_s}}{g + \frac{t_d}{\epsilon_r}} \right)$$

$$36 \quad C_{ground}^{off} = C_{ground_pp}^{off} + C_{ground_ff}^{off} = \frac{\epsilon_o \cdot A_g}{g + \frac{t_d}{\epsilon_r}} + \frac{2\epsilon_o \sqrt{A_g}}{\pi} + \frac{2\epsilon_o \sqrt{A_g}}{\pi} \ln \left(\frac{2\pi \sqrt{A_g}}{g + \frac{t_d}{\epsilon_r}} \right)$$

בצורה דומה ניתן לרשום את הביטוי לקיבול הכללי הנוצר, במצב בו המתג במגע עם קו התמסורת - במצב On. במקרה זה הקיבול הנובע משפיית השדה קטן יחסית לקיבול הנובע מהמשטחים המקבילים, בשל איפוס המרווח (g) והשימוש בדיאלקטריקן בעל קבוע דיאלקטרי גבוהה יחסית לאוויר.

$$37 \quad C_{signal_pp}^{on} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r A_{signal}}{t_d} \quad [F]$$

$$38 \quad C_{ground_pp}^{on} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r A_{ground}}{t_d} \quad [F]$$

כאשר A_{signal} הינו השטח המשותף (בהיטל על) למתג ולקו הסיגנל ו- A_{ground} הינו השטח המשותף (בהיטל על) למתג ולקו האדמה (באחד הצדדים). במבנה זה של המתג (במצב On או במצב Off) יש לחשב את הקיבול בין משטח האדמה למתג ובין משטח האות למתג ולחברם עפ"י משוואה 39:

$$39 \quad C_{switch} = \frac{2 \cdot C_{signal} \cdot C_{ground}}{C_{signal} + 2 \cdot C_{ground}} \quad [F]$$

בכדי לוודא שתכן המתג עומד בדרישות התדר הגבוהה, בוצעו מספר חישובים אנליטיים, על בסיס ניתוח הרשת והפעלת המודל המקובץ.

במתג אופייני שתוכנן :

$$40 \quad \begin{aligned} A_{signal} &= s \cdot W' = 50 \cdot 80 = 4000 [\mu^2] \\ A_{ground} &\cong 56900 [\mu^2] \\ \frac{2 \cdot A_{ground}}{A_{signal}} &\cong 28.5 \end{aligned}$$

3.4.2.2 חישוב פרמטרים אופייניים במצב Off

בכדי לחשב את השפעת המתג על קו התמסורת, ע"י חישוב Insertion Loss או Reflection Loss נחשב כמקודם את קיבול במצב Off :

$$\begin{aligned} C_{signal-pp}^{off} &= \frac{8.85 \times 10^{-18} \cdot 4000}{5 + \frac{0.15}{22}} = 7.07 \times 10^{-15} [F] \\ C_{signal}^{up} &= C_{signal-pp}^{up} + \frac{2 \cdot 8.85 \times 10^{-18} \cdot 4000^{1/2}}{\pi} + \frac{2 \cdot 8.85 \times 10^{-18} \cdot 4000^{1/2}}{\pi} \ln \left(2\pi \frac{4000^{1/2}}{5 + \frac{0.15}{22}} \right) = 8.99 [fF] \\ C_{ground-pp}^{up} &= \frac{8.85 \times 10^{-18} \cdot 56900}{5 + \frac{0.15}{22} - 0} = 1 \times 10^{-13} [F] \\ C_{ground}^{up} &= C_{ground-pp}^{up} + \frac{2 \cdot 8.85 \times 10^{-18} \cdot 56900^{1/2}}{\pi} + \frac{2 \cdot 8.85 \times 10^{-18} \cdot 56900^{1/2}}{\pi} \ln \left(2\pi \frac{56900^{1/2}}{5 + \frac{0.15}{22}} \right) \\ &= 1.1 \times 10^{-13} [F] \\ 41 \quad C_{switch}^{up} &= \frac{2 \cdot C_{signal} \cdot C_{ground}}{C_{signal} + 2C_{ground}} = 8.63 [fF] \\ |S_{11}^{off}|_{f=26GHz}^2 &\cong \frac{w^2 C_{switch}^2 Z_0^2}{4} = 0.035 \\ 42 \quad \text{Reflecion Loss}_{26GHz} &= 20 \log |S_{11}| = -29db \\ |S_{11}^{off}|_{f=40GHz}^2 &\cong \frac{w^2 C_{switch}^2 Z_0^2}{4} = 0.054 \\ \text{Reflecion Loss}_{40GHz} &= 20 \log |S_{11}| = -25db \end{aligned}$$

חישוב S21, מראה על Insertion loss קטן מ- 0.1db בכל תחום התדרים.

3.4.2.3 חישוב פרמטרים אופייניים במצב On

$$C_{signal}^{on} = \frac{8.85 \times 10^{-18} \cdot 22 \cdot 4000}{0.15} = 5.192 \times 10^{-12} \text{ [F]}$$

$$43 \quad C_{ground}^{on} = \frac{8.85 \times 10^{-18} \cdot 22 \cdot 56900}{0.15} = 1.48 \times 10^{-10} \text{ [F]}$$

$$C_{switch}^{on} = \frac{2 \cdot C_{signal} \cdot C_{ground}}{C_{signal} + 2C_{ground}} = 5.02 \text{ [pF]}$$

וניתן לחשב את ההספק העובר במצב On (Isolation) בהזנחת ההשראות וההתנגדות של המתג :

$$|S_{21}^{on}|_{f=26GHz}^2 \cong \frac{4}{4 + w^2 C_{switch}^2 Z_0^2} = \frac{4}{4 + (2\pi \cdot 26 \times 10^9)^2 \cdot (5.02 \times 10^{-12})^2 \cdot 50^2} = 0.0024$$

$$44 \quad Isolation_{26GHz} = 20 \log |S_{21}| = 26.2db$$

$$|S_{21}^{on}|_{f=40GHz}^2 \cong \frac{4}{4 + w^2 C_{switch}^2 Z_0^2} = \frac{4}{4 + (2\pi \cdot 40 \times 10^9)^2 \cdot (5.02 \times 10^{-12})^2 \cdot 50^2} = 0.001$$

$$Isolation_{40GHz} = 20 \log |S_{21}| = 29.9db$$

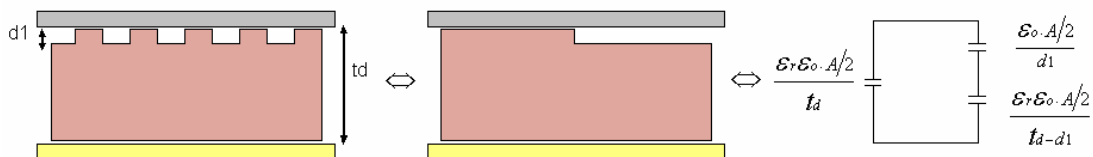
החישובים הללו מקורבים, תוך הזנחת השפעות נוספות כמו איכות הדיאלקטריקן (אחידות פני שטח המגע), השראות המתג וההתנגדות האווהמית שלו, אולם מהווים אינדיקציה לביצועים הצפויים בתדרי ההפעלה הרצויים.

3.4.2.4 איכות הדיאלקטריקן והתופעות הנלוות אליו

במצב ON כאשר המתג בא במגע עם קו התמסורת ע"ג שכבת המבדד נוצר קיבול גדול :

$$45 \quad C^{on} = C_{pp}^{on} + C_{ff}^{on} \approx C_{pp}^{on} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_o \cdot A}{t_d}$$

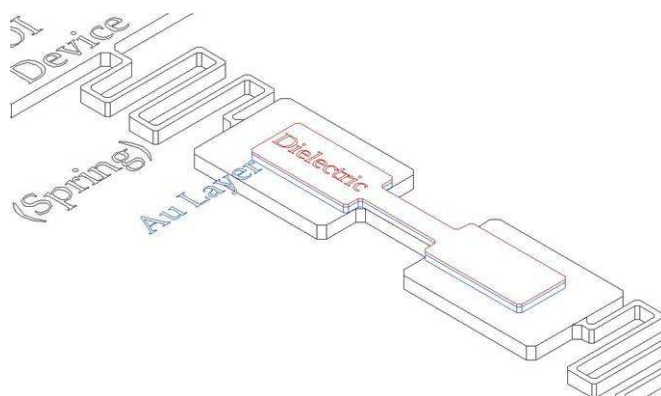
הגורם העיקרי המשפיע על הקיבול, בנוסף לקבוע הדיאלקטרי של המבדד, הינו טיב פני השטח שלו. ככל שפני השטח מחוספסים יותר, קטן שטח המגע והקיבול קטן כפי שמדגים האיור הבא :



d_1 היא האמפליטודה של החספוס הממוצע של פני שטח הדיאלקטריקן.

החספוס משמעותי מאוד במצב On, בו נדרש קיבול מקסימלי, ועלול לגרום להקטנת הקיבול ופגיעה בטיב המיתוג.

מימוש הקבל הנדרש לצורך המיתוג מבוצע ע"י נידוף של שכבת זהב עבה (כ-1 מיקרון) ע"י החלק המרכזי של המתג. שכבה זו חופפת הן למשטחי האדמה והן לקו האות. ציפוי שכבה זו בשכבה מבודדת בעלת מקדם דיאלקטרי גבוה (Ta_2O_5) יוצרת את אפקט הקיבול בעת הצמדת גוף המתג לקו התמסורת, כמתואר בתרשים 29.



תרשים 29 – שכבת מתכת (זהב) ודיאלקטריקון (טנטאלום פנטא-אוקסיד) ליצירת המגע קיבולי

Figure 27 – Au and Ta_2O_5 Layers – Forming the Capacitive contact

בכדי לממש מתג בעל נתוני מיתוג אלקטרו מכניים זהים אך בשיטת מיתוג שונה – מיתוג אוהמי במקום מיתוג קיבולי, מומשה שכבה דיאלקטרית בין מבנה הסיליקון למבנה הזהב. מבנה זה מביא את המתכת למגע ישיר עם משטחי האדמה ומשטחי קו האות אך מבודד את המתח הישר בין הסיליקון למוליכים ומונע פריצה.

3.5 תכן וביצוע תהליך הייצור

תכן תהליך ייצור המתג מתבסס על תהליכי שכבות דקות ותהליכי מיקרו עיבוד זמינים במסגרת קבוצת המחקר ובחדרים הנקיים במרכז למיקרואלקטרוניקה בטכניון. לאחר גיבוש ארכיטקטורת המתג הכללית בוצע תכן תהליך ולאחריו תכן המסכות הנדרשות.

עם סיום תכן התהליך וייצור המסכות, בוצעו מספר שלבי ביניים לכיול תהליכים קריטיים (איכול יבש למשל), על גבי מצעי סיליקון הומוגניים ונבדקה האינטגרציה של התהליכים לפני תחילת הייצור על גבי מצעי ה-SOI.

להלן יוצג מבנה המתג הכללי, תהליכי המימוש השונים בחתך מסכות, תהליכי ניסור והפרדה סופיים ותהליך ההרכבה.

3.5.1 מבנה המתג הכללי

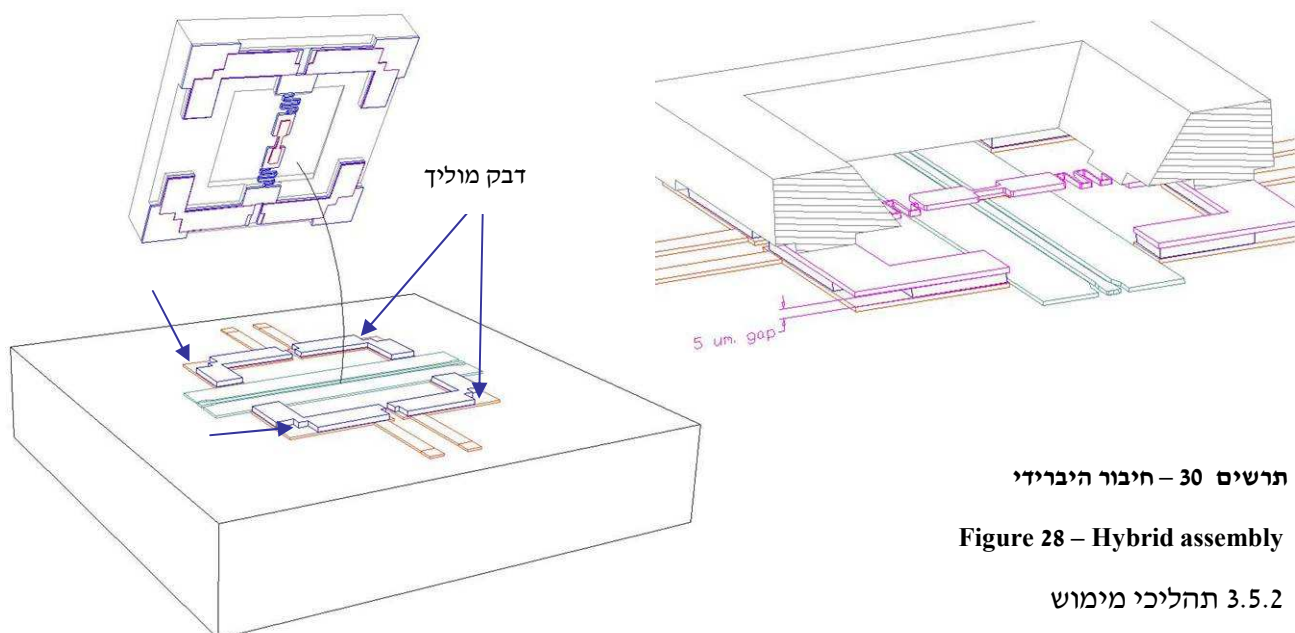
המתג מורכב מחיבור היברידי של שני חלקים:

א. מסגרת הרכיב המכילה את הרכיב/רכיבים

ב. המצע עליו ממומש קו התמסורת והמוליכים למתח ההפעלה. מימוש קו התמסורת וקווי מתח ההפעלה תוארו בהרחבה בסעיף 3.2.2 לעיל.

חיבור מסגרת הרכיב למצע עם קו התמסורת מבוצע כך שהמתג מונח לרוחבו של קו התמסורת, בדיוק של כ- ± 5 מיקרון במיקום.

החיבור החשמלי מבוצע ע"י ארבע טיפות דבק מוליך מסוג H20e של חברת אפוטק כמתואר בתרשים 29 (Epotek). דבק זה בעל מוליכות של כ- 0.0004 אוהם*ס"מ מהווה חיבור חשמלי בעל התנגדות זניחה בין ארבעת קווי המתח לשכבת סיליקון ההתקן ברכיב. הדבק מונח בפינות ההתקן, ולא על המרווחים כך שלאחר ההדבקה מתקבל מרווח בין שכבת הסיליקון לשכבת מוליך קו התמסורת בעובי מרווחי האלומיניום שעל קו התמסורת.



תרשים 30 – חיבור היברידי

Figure 28 – Hybrid assembly

3.5.2 תהליכי מימוש

תהליכי המימוש של גוף המתג מבוססים על תהליכי שכבות דקות ותהליכי איכול עמוקים בכדי ליצור את המבנה הסופי שתואר לעיל.

חומר הגלם שהוגדר מבוסס על SOI Wafer בעל עובי שכבת ההתקן (Device layer) של 10 מיקרון. עובי שכבת תמיכה (Handle layer) של 490 מיקרון ותחמוצת (SiO_2) בין בעובי של 1000 Å. כל הפיסות עברו שיקוע של שכבת SiN במערכת LPCVD בכדי לאפשר שימוש בשכבה זו כמסכה עבור איכול רטוב של הסיליקון והגדלת הבידוד בין הרכיב לקו התמסורת. הסעיפים הבאים מפרטים, עפ"י שלבי הייצור, את התהליכים המרכזיים שבוצעו. בכל סעיף מוצגים הפרמטרים הרגישים ביותר לתפקוד המתג.

3.5.2.1 מימוש רכיב מיתוג תדר גבוה

הרכיב המבצע את המיתוג הקיבולי (או זה המבצע את המיתוג המוליך) הינו הרכיב הראשון הממומש על פני שכבת ההתקן של המצע, להלן "צד קדמי".

תיאור תהליך	
ניקוי RCA.	1
ליטוגרפיה בפוטו רזיסט חיובי עבה (AZ4562) בעובי של 10 מיקרון	2
נידוף (E-Beam) של שכבות כרום וזהב $300\text{\AA}$ Cr/ $20000\text{\AA}$ Au ועליהם נידוף שכבה דיאלקטרית של Ta_2O_5 בעובי של 1000 Å	3
ביצוע תהליך Lift Off להסרת השכבות באזורים לא רצויים.	4

טבלה 8 – מימוש אזור המיתוג הקיבולי

Table 8 – Fabrication of capacitive structure

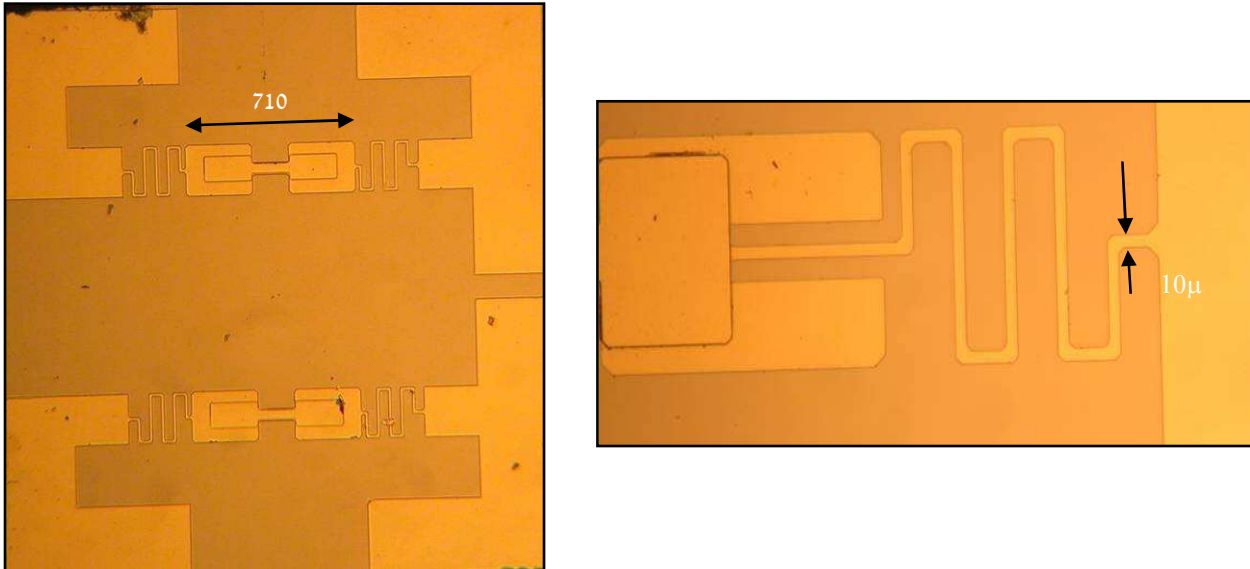
בסיום תהליך ראשוני זה מוגדרים כל רכיבי המיתוג ע"י שכבת המוליך העבה ושכבת הדיאלקטריקון. יש לציין שתהליך ה-lift off להגדרת הרכיב הינו חיוני כיוון שלא ניתן לבצע איכול יעיל של שכבת מבדד מסוג זה (האיכול ב-HF אינו יעיל דיו).

3.5.2.2 מימוש גוף המתג (מסגרת וקפיצים)

גוף המתג כולל הן את רכיב הסיליקון המרכזי המשמש כאלקטרודה להפעלת הכוח האלקטרוסטטי (אל מול משטחי האדמה בקו התמסורת) וכן את הקפיצים ומסגרת הרכיב המגדירים את המאפיינים האלקטרו-מכניים העיקריים - כמתח ההפעלה ומהירות המיתוג.

גוף המתג "נחשב" מתוך שכבת ההתקן במצע ולפיכך עובי השכבה הינו 10 מיקרון. בכדי לאפשר את האיכול האנ-איזוטרופי ולייצר פרופילי איכול ניצבים למשטח (שטח חתך ריבועי לקפיצים ולגוף המתג) נדרש תהליך איכול יבש לסיליקון. תהליך איכול זה אינו תהליך סטנדרטי וכדי לכילו בוצעו מספר שלבי ביניים לייצוב

ואופטימיזציה של תהליך האיכול ע"י מערכת RIE (Reactive Ion Etch). התהליך מבוסס על שלבי איכול (ע"י פלסמת SF_6) ופסיבציה (ע"י שימוש בפלסמת חמצן) המבוצעים בזה אחר זה עד ההגעה לעומק הנדרש. כמסכת הגנה לשכבות רכיב המיתוג, לפני שטח הסיליקון באזורי הקפיצים והמסגרת, ממומשת מסכת ניקל המגן מפני פגיעת הפלסמה. עם סיום שלב זה מוגדר הרכיב כולו, על גבי שכבת התחמוצת המפרידה בין שכבת המצע ושכבת ההתקן.



תמונה 6 – רכיב המיתוג לתדר גבוה וגוף המתג הסיליקוני לפני שחרור

Picture 6 – Capacitive switching area and Silicon based switch body

להלן תיאור תהליך מימוש גוף המתג :

תיאור תהליך	
נידוף (E-Beam) של שכבת ניקל $1000\text{\AA}$ Ni	1
ליטוגרפיה בפרוטו רזיסט חיובי דק ואיכול ניקל	2
ביצוע תהליך איכול RIE – 90 סבבים – קצב איכול של כ- 0.15 מיקרון לדקה.	3
הסרת ניקל מכלל הרכיב.	4

טבלה 9 – תהליך מימוש גוף המתג מסיליקון

Table 9 –Silicon part fabrication process

3.5.2.3 מיקרו עיבוד צד אחורי

איכול המצע מבוצע לשם פתיחת חלון המדידה ויכולת לאכל את התחמוצת על כל חלקו האחורי של גוף המתג.

בתהליך של ליטוגרפיה לצד אחורי (Back Side Lithography), הוגדרו פתחי מסכת איכול הסיליקון ע"י פוטורזיסט ואיכול יבש מבוסס RIE של שכבת הניטריד.

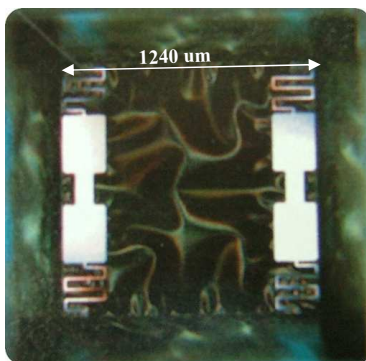
בכדי לבצע איכול סיליקון רטוב ללא פגיעה בשכבת הסיליקון שבפני השטח הקדמיים (הרכיבים כבר מוגדרים) נעשה שימוש במתקן מיוחד החושף רק את הצד האחורי של הפיסה לתמיסה ומונע מגע של המאכל בצד הקדמי.

האיכול מבוצע בטמפרטורה של 80 מעלות צלזיוס, בקצב איכול של כ- 1.6 מיקרון לדקה ונעצר בשכבת התחמוצת המפרידה בין שתי שכבות הסיליקון.

תיאור תהליך	
ליטוגרפיה של צד אחורי (Back Side Lithography) בפוטו רזיסט חיובי דק ואיכול יבש של שכבת SiN.	1
איכול רטוב בתמיסת KOH, במתקן לחשיפת צד אחד בלבד.	2

טבלה 10 – תהליך מימוש גוף המתג מסיליקון

Table 10 – Switch Silicon body fabrication process



עם סיום האיכול מתקבל מבנה עדין מאוד, בו מתגי הסיליקון מחוברים לשכבת התחמוצת ויוצרים בה מאמצים מקומיים. בתמונה 7 מתואר מתג לפני שחרור התחמוצת, הנראית כבד מקומט.

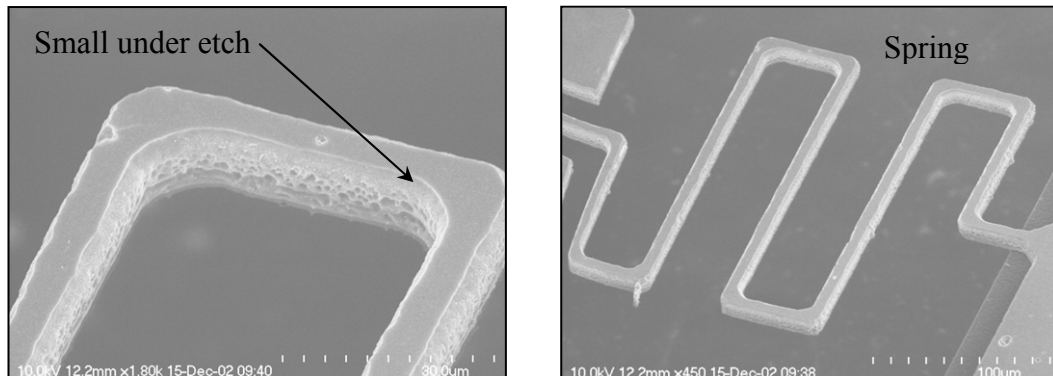
תמונה 7 – מתג לפני שחרור תחמוצת

Picture 7 – Switch before BOX etch

3.5.2.4 תהליך ניסור ושחרור

בכדי לעמוד בתהליך הניסור שוטחה שכבת פוטורזיסט דקה על גבי ההתקנים והפיסה כולה מנוסרת לגודל סופי.

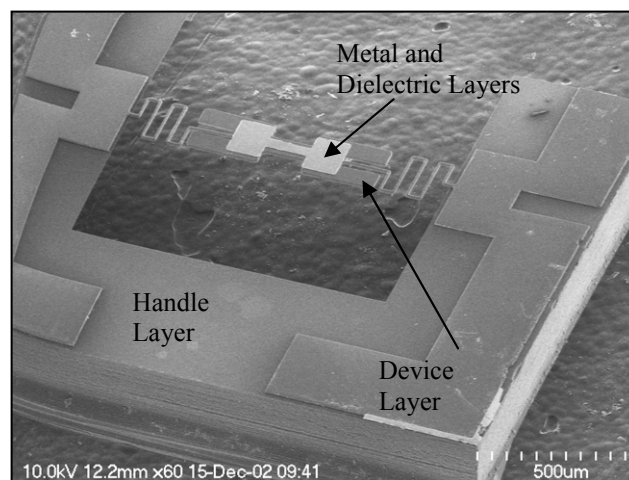
לאחר ניסור ומיון ההתקנים, מבוצע שחרור בתמיסת BHF לאיכול התחמוצת ושחרור סופי של המתגים. להלן מספר תמונות המתארות מתגים לפני הרכבה:



תמונה 8 – מבנה קפיץ וצורת איכול

Picture 8 – Switch structure and etch profile

בתמונה 8 לעיל, נראה מבנה הקפיץ המשוחרר כאשר פרופיל האיכול מבוסס RIE קרוב לפרופיל אנכי, עם איכול יתר מסוים מתחת למסכת הניקל שהגדירה אותו (Under Etch).



תמונה 9 – מתג כולל

Picture 9 – Full switch structure

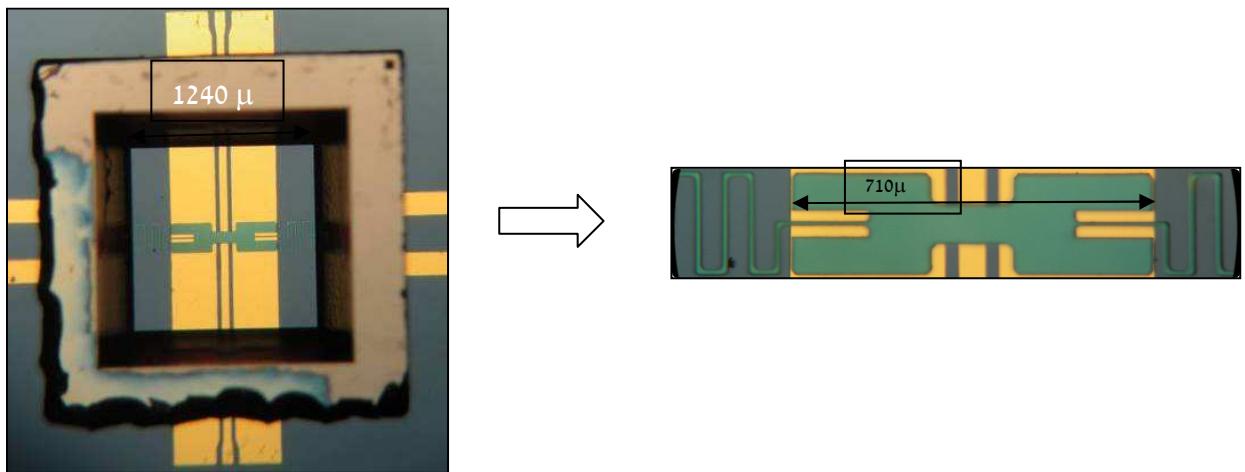
בתמונה 9, נראה מבנה המתג כולו, כולל המסגרת המורכבת משכבת התמיכה, שכבת ההתקן בה ממומש גוף המתג, ושכבות המתכת והמבדד (בלבן) במרכז גוף המתג.

3.5.3 תהליך ההרכבה

תהליך ההרכבה של המתגים בוצע ע"י מערכת Flip Chip Bonding של חברת RDA.

החיבור בוצע בדיוקי השמה מישוריים של כ- $\pm 5\mu$, ו- $\pm 1\mu$ מקבילות בין מישור המתג למישור המצע. לשם החיבור המכני והחשמלי הושמו ארבע טיפות דבק מוליך (אפוקסי עם פתיתי כסף) בעל התנגדות נמוכה וחוזק מכני גבוה. תהליך ייבוש הדבק בוצע בטמפרטורה של 120 מעלות צלזיוס למשך כ- 15 דקות. בסיום ההרכבה מוכן המתג לביצוע מדידות תדר גבוה.

כדי לבצע מדידות מכניות, נארזו המתגים ע"ג מארזי TO-16 תוך שימוש ב- Wire Bonding לחיבור משטחי האדמה וארבעת מגעי ה- DC. התנגדות המתג בין מגע DC אחד למשנהו (התנגדות כלל הרכיב) נמדדה באזור ה- $10K\Omega$.



תמונה 10 – מיקום מתג לאחר הרכבה

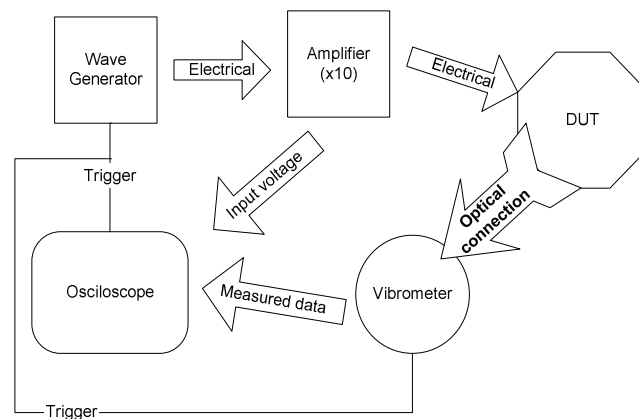
Picture 10 – Switch position after assembly

3.6 מערכות מדידה

ביצוע המדידות האלקטרו-מכניות התבסס בחלקו על ציוד המדידה במעבדת המיקרו-מכניקה בפקולטה להנדסת מכונות, לאחר התאמה ובניית מערכת מדידה כך שתאפשר מדידות הפרמטרים הנדרשים מהמתג. מדידות התדר הגבוה לקו התמסורת ולמתגים המורכבים, בוצעו בחלקן בטכניון ובחלקן במעבדת המיקרוגל של קבוצת תר"ש ברפא"ל. המדידות בוצעו על בסיס מערכות מדידת RF, המאפשרות מדידה ישירה על גבי המצע.

3.6.1 מדידה מכנית

מדידות הפרמטרים הגיאומטריים בוצעו ע"י מכשיר מדידה אופטי – ויברומטר (Vibrometer) המודד בעזרת קרן לייזר, מהירות ומיקום של מישורים מחזירי אור. קרן הלייזר ממוקדת דרך מיקרוסקופ על חלקו האחורי של המתג, ומאפשרת מדידה נקודתית של המהירות והמיקום האנכיים ביחס לעירור החשמלי. בכדי לאפשר ביצוע מדידות שונות חוברה מערכת הכוללת: מקור אות (Wave Generator), מגבר אנלוגי $\times 10$, אוסצילוסקופ בעל 4 ערוצים והויברומטר. המערכת חוברה כך שעם יצירת העירור החשמלי, מקבלים הויברומטר והאוסצילוסקופ אות סנכרון ומתבצעת מדידת מתח ומיקום במקביל על אותו ציר זמן, כמתואר בתרשים 30.



תרשים 31 – מערכת מדידה אלקטרו-מכנית

Figure 29 – Electro Mechanical measuring setup

לשם מדידת אופיין המתג האלקטרו-מכני בוצעו המדידות הבאות:

א. מדידות תדר עצמי של הרכיב.

מדידה זו מתבססת על ערור מדרגה במתח נמוך ממתח ההפעלה, ומדידת המחזור של התנועה גם בעלייה וגם בירידת המתח. המדידה מבוצעת כשהרכיב נמצא באווירת וואקום חלשה של כ- 1 Torr ובתדר הפעלה נמוך של כ- 20 הרץ. אווירת הוואקום מקטינה את השיכוך ומאפשרת מדידת תדר קרוב לתדר העצמי של הרכיב.

- ב. מדידת מתח הפעלה (V_{pi}) בלחץ אטמוספרי וזמן מיתוג.
מבוצע ע"י הגדלה של מדרגת המתח עד לקבלת מרווח תנועה שאינו גדל, כאן נמדד הפרש הזמן ממדרגת המתח עד להתייצבות התנועה המכנית.
- ג. מדידות מתח הפעלה (V_{pi}) ומתח הניתוק (V_{po})
מדידה זו מבוצעת ע"י הפעלת גל משולש בתדר נמוך (10 הרץ) המהווה שינוי קוואזיסטטי במיקום המתג. המתח המרבי גדול ממתח ההפעלה הצפוי ומתח ההפעלה מוגדר עפ"י אי-הרציפות בתנועת המתג והמשוב החיובי. מתח השחרור נמדד עם הירידה בגל המשולש ושחרור המתג מקו התמסורת.

3.6.2 מדידת תדר גבוה

מדידות תדר גבוה מבוצעות ע"י מדידות Two Port S-Parameters ע"י Network Analyzer, תוך שימוש בשולחן עבודה ייעודי המכיל פרובים (Probes) למגע על קו התמסורת עצמו. וחיבור פרובים נוספים לשם הפעלת אות DC לעירור המתג.

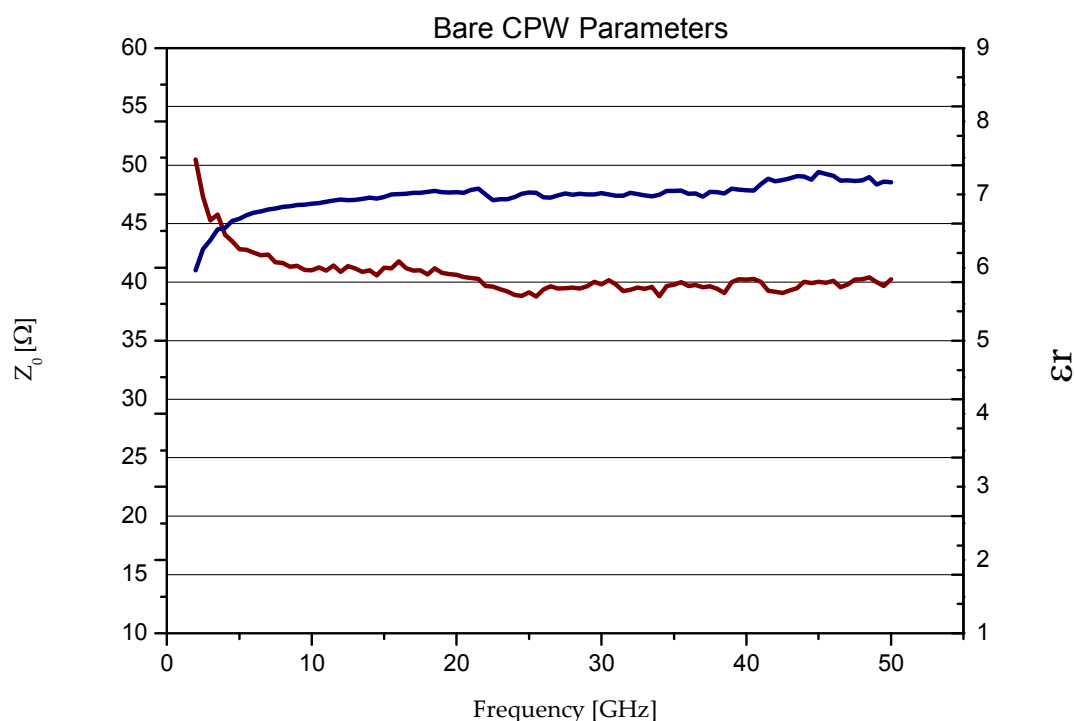
פרק 4 – תוצאות

בפרק זה יוצגו תוצאות מאפיינות של מדידות רכיבי המתג והמתג המזווד. לשם מדידות מכניות בוצע זיווד של שני רכיבים, מדידות הרכיבים בתדר גבוה בוצעו על שני רכיבים נוספים.

4.1 מדידות מאפייני קו תמסורת

לאחר מימוש קו התמסורת הערום, בוצעה מדידה של הפרמטרים העיקריים שלו בכדי לוודא שניתן יהיה למדוד את השפעת המתג על הקו ולוודא שתוצאות הסימולציה מתאימות למתקבל במציאות.

ממדידות קו התמסורת בלבד התקבלו הגרפים הבאים:

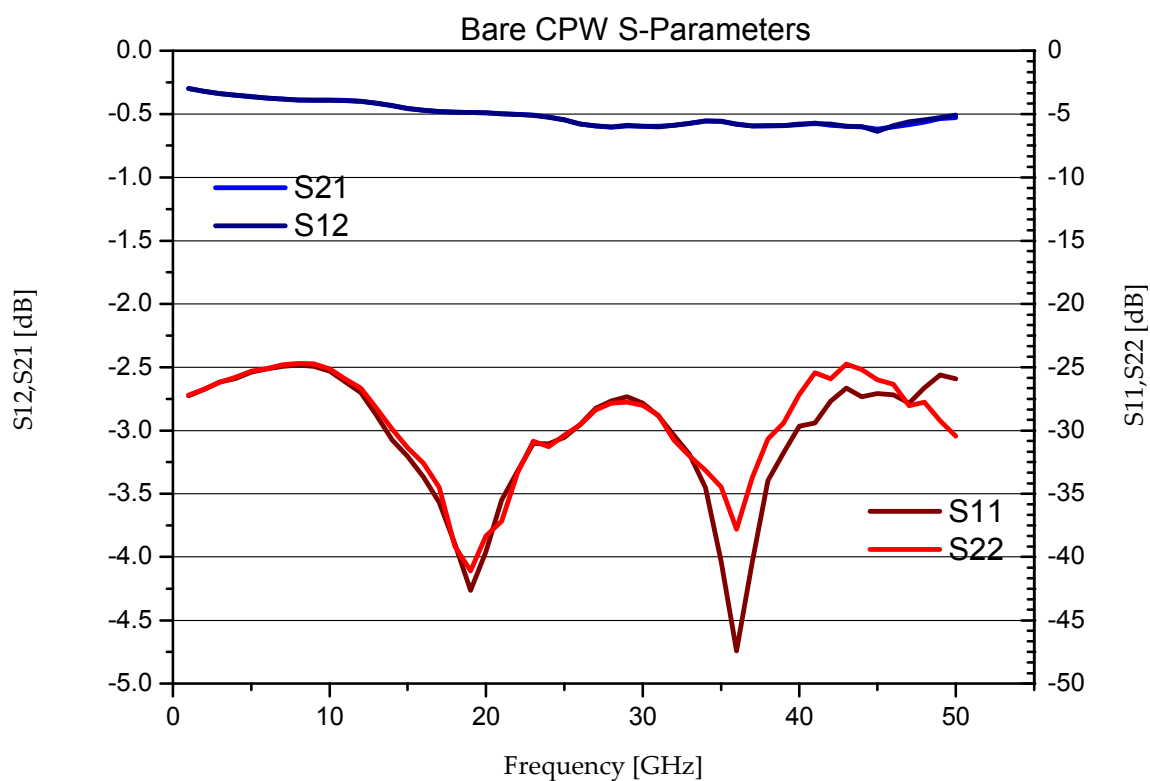


תרשים 32 – פרמטרי קו תמסורת ערום

Figure 30 – Bare CPW Parameters

התנגדות הקו התקבלה בסביבות 48 אוהם, והמקדם הדיאלקטרי האפקטיבי בסביבות 5.7 לעומת ערכים של 50.3 ו-6.45 עפ"י הסימולציות הנומריות - סטייה של כ- 4.5% בהתנגדות ו- 11% במקדם. נתונים אלו מוצגו מתוך מדידות קווי התמסורת המיועדים לקליברציה תוך ביצוע De-Embedding של אזור המגעים המתאם את הקו למכשיר המדידה.

במידות פרמטרי פיזור התקבלו התוצאות הבאות :



תרשים 33 – פרמטרי פיזור של קו תמסורת ערום

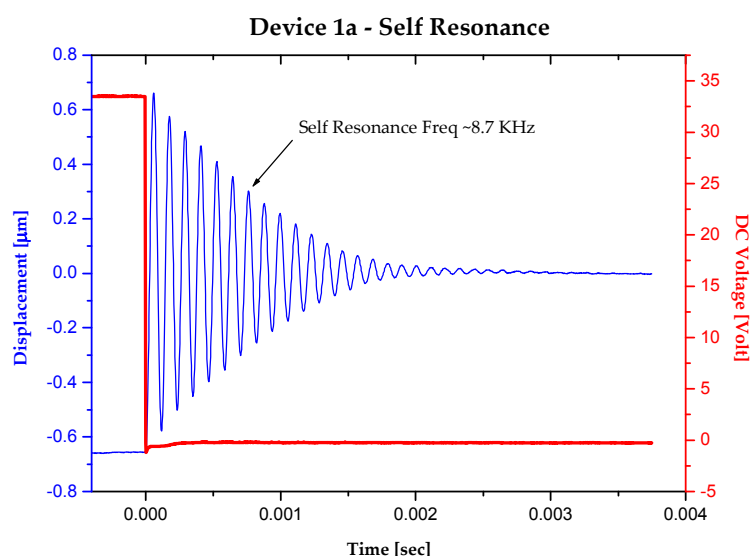
Figure 31 – S-Parameters of bare CPW

פרמטרי פיזור שהתקבלו (לאורך קו התמסורת המלא) תואמים את הסימולציות, ובשל ערכם הנמוך יחסית מאפשרים השוואה בין ההפסד של קו התמסורת הערום לקו התמסורת עם המתג.

4.2 מדידות תכונות אלקטרו-מכאניות

להלן תוצאות המדידות של שני מתגים עפ"י סוגי המדידות שהוצגו בסעיף 3.6.1 לעיל. המתג הראשון הינו המתג בעל קבוע קפיץ הנמוך יותר והשני בעל קבוע קפיץ גבוה יותר, 14 N/m לעומת 20 N/m.

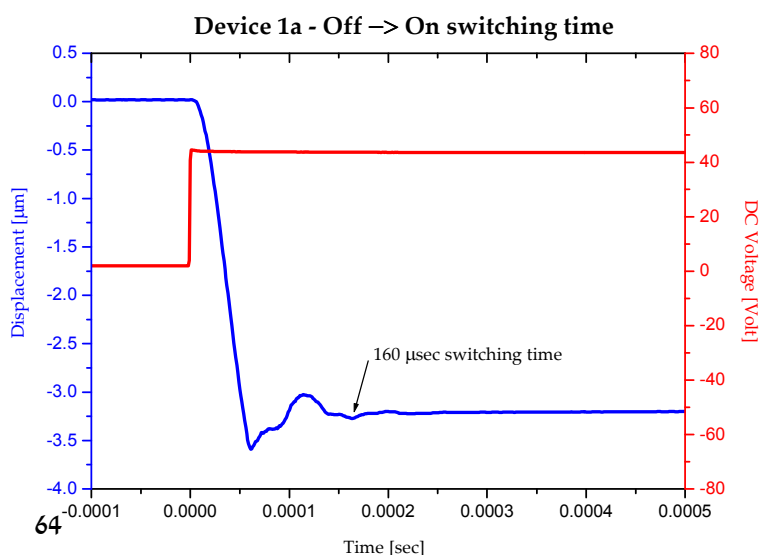
מדידה ראשונה של המתג כוללת הפעלת מתח בצורת פונקציה מדרגה – כשהמתח המקסימלי קטן ממתח ההפעלה. המתג לפיכך נע בין שני מצבי קיצון. בעת איפוס המתח, מתבטל הכוח האלקטרוסטטי והרכיב מבצע תנועה הרמונית בהתאם למודל המפושט (מסה רתומה לקפיץ הנעה בתוך תווך מרסן). המדידה מבוצעת באווירת וואקום כדי להשפיע מעט ככל שניתן על הרכיב.



תרשים 34 – מדידת תדר עצמי רכיב 1a

Figure 32 – Resonance Freq. of device 1a.

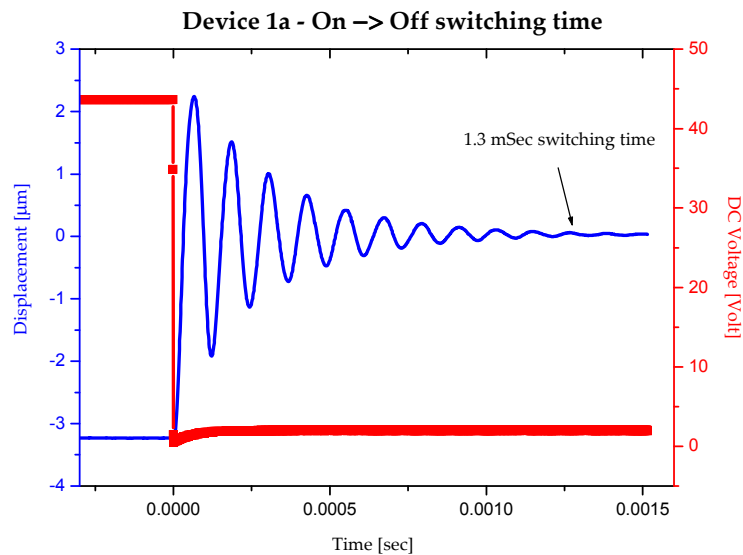
המדידה הבאה הינה מדידת זמן המיתוג בשני סוגי המיתוג – ממצב On למצב Off וחזרה. זמן המיתוג תלוי באופן ישיר במתח ההפעלה, אם יופעל מתח הגדול משמעותית ממתח הסף, יקוצר זמן המיתוג להפעלה. במדידות אלו, נמדדו זמני המיתוג בעת הפעלת מתח הסף בלבד, מדידה זו מהווה את החסם העליון לזמן המיתוג.



במדידה מתקבל זמן מיתוג עד לריסון מלא של התנועה, של כ- 160 מיקרו שניות.

תרשים 35 – זמן מיתוג להפעלה - רכיב 1a

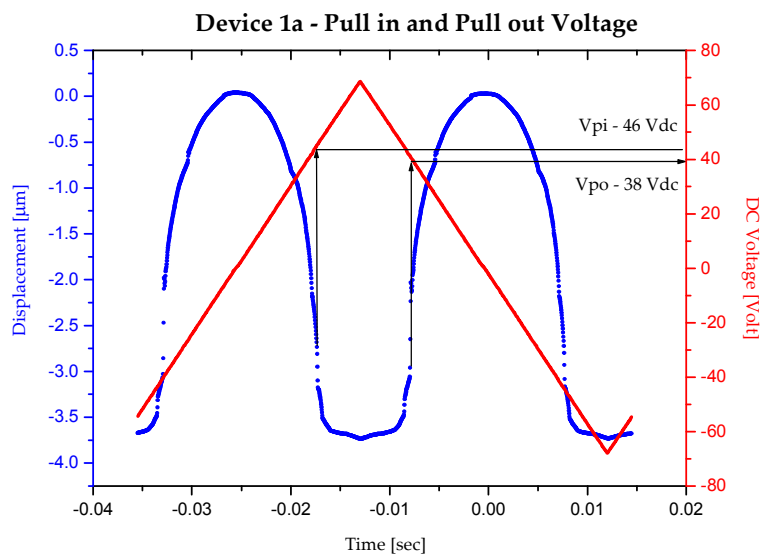
Figure 33 – On state switching time device 1a



תרשים 36 – זמן מיתוג לניתוק - רכיב 1a

Figure 34 – Off state switching time – device 1a

זמן המיתוג למצב Off ארוך בהרבה (כ- 1.3 מילישניות) וזאת בשל הריסון הטבעי הנמוך של המתג, למרות הלחץ האטמוספרי בו מבוצעת מדידה זו.

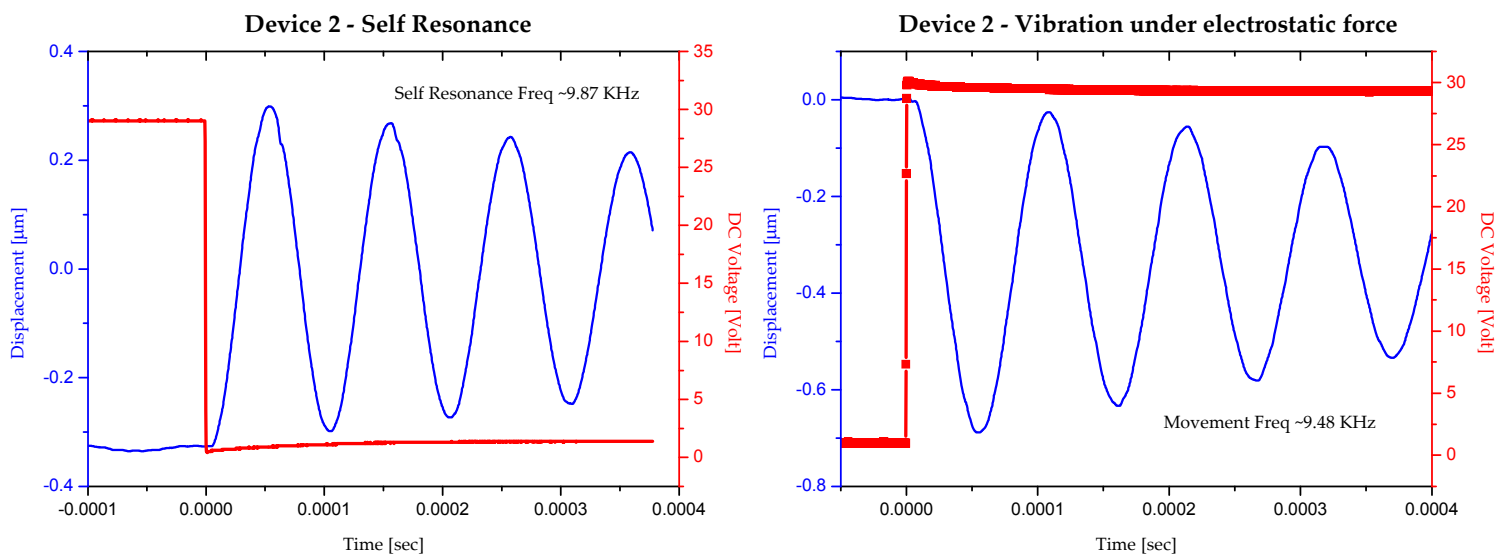


תרשים 37 – מתח סף להפעלה ושחרור – רכיב 1a

Figure 35 – Vpi/Vpo measurements – device 1a.

מתח ההפעלה נמדד ע"י שן מסור איטי המונע השפעות דינאמיות של מסת המתג. נמדדו ערכים להפעלה ושחרור (ערכים שונים) וכצפוי אין הבדל בין הפעלת מתח חיובי או שלילי לקבלת אפקט התנועה.

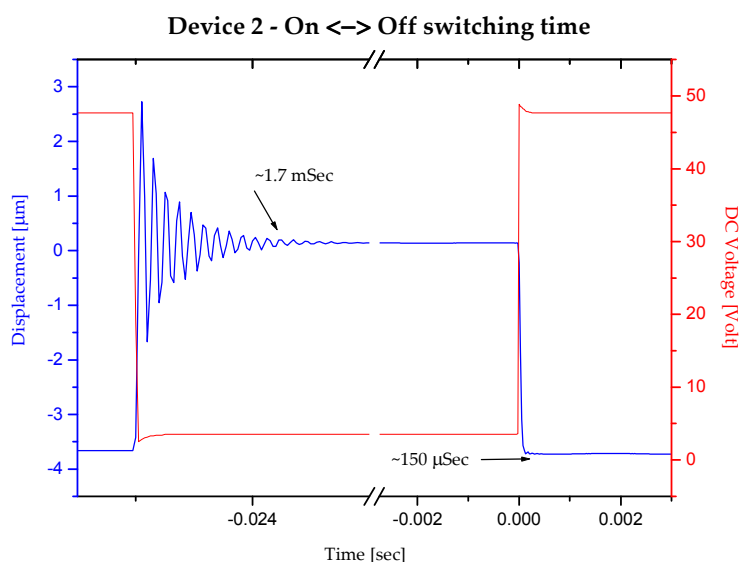
מידות הרכיב השני מציגות פרמטרים דומים לאלו שנמדדו ברכיב הראשון :



תרשים 38 – תדר עצמי בשחרור ובהפעלה – רכיב 2

Figure 36 – Self resonance in two switching states – device 2

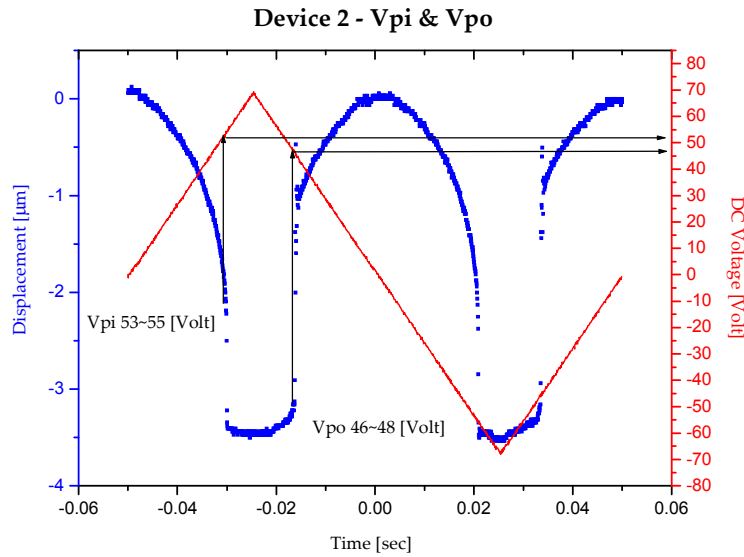
בהשוואה בין תדירות התנועה הלא מאולצת (בשחרור המתג) ותדירות התנועה תוך הפעלת כוח אלקטרוסטטי (בהפעלה חלקית) מתקבלת התוצאה הצפויה בה תדירות התנועה קטנה עקב הפעלת הכוח המאליץ.



תרשים 39 – זמני מיתוג – רכיב 2

Figure 37 – Switching time – device 2

זמני המיתוג במתג זה דומים לנמדד במתג הראשון, כשיחס הזמנים עומד על כ- 10:



תרשים 40 – מתח סף להפעלה ושחרור – רכיב 2

Figure 38 – Vpi/Vpo measurements – device 2

גם כאן נמדדו ערכים להפעלה ושחרור (ערכים שונים). קיימת התאמה בין מתחי ההפעלה הגבוהים יותר והתדירות העצמית הגבוהה יותר של מתג זה – ובהתאמה לקבוע הקפיץ הגבוה של מבנה זה ביחס למבנה מתג 1a.

במדידות רכיבים נוספים נמדדו תדרים עצמיים, בתחום של 9-11 קילו הרץ, בערך נמוך מעט ביחס לתכן.

רכיב	תדר עצמי (Hz)
IV-1	11.3
V	9.3
VI	10

סיבות אפשריות להקטנת התדר הינה מסת הקפיצים התורמת למסת הרכיב כולו ואי-דיוקים בנתוני החומר בעת חישוב קבוע הקפיץ. ההפרש הקטן יחסית מאפשר תיקון של המודלים לשם ביצוע תכן עתידי. במדידות פרמטרים של רכיבים נוספים התקבלו מתחי הפעלה נמוכים מעט יותר :

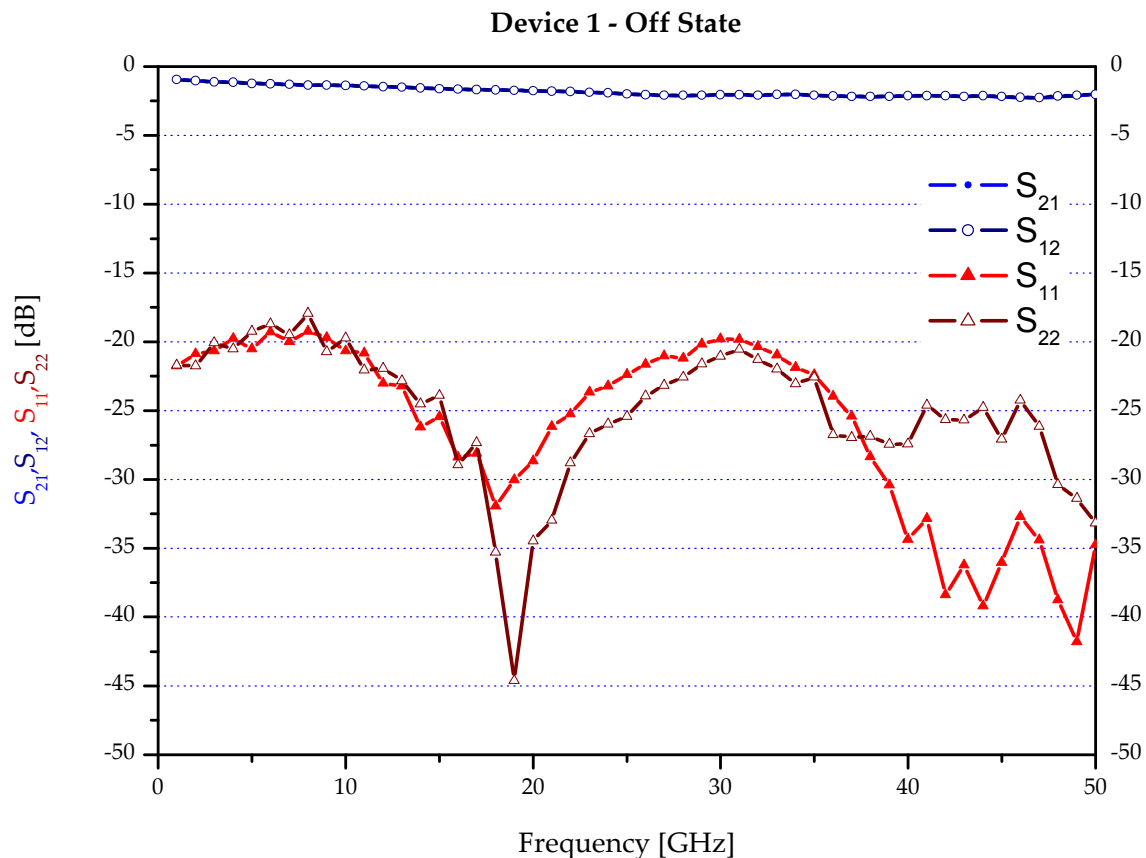
רכיב	מתח הפעלה (Vdc)	זמן מיתוג (Sec)	תדר עצמי (Hz)	מרחק תנועה (μm)
III	34	-	9	3
VII	27	120μSec	9	3.4

קיימת שונות במתחי ההפעלה של הרכיבים השונים, הנובע בין השאר מדיוקי ההשמה של הרכיבים על גבי קו התמסורת בהקשר למקבילות הרכיב ותפקוד מרווחי האלומיניום.

4.3 מדידות תדר גבוה

מדידות תדר גבוה של הרכיבים בוצעו בשני מופעים. המדידות הראשוניות בוצעו על בסיס מתגים בעלי משטח מגע קיבולי, מדידות אלו הראו Insertion loss נמוך, אולם בעת ההפעלה לא נוצר מיתוג, ככל הנראה בשל איכות פני שטח נמוכה של הדיאלקטריקן. קובץ המדידות השני בוצע על מתגים בעלי מבנה מכני זהה אך בעלי מנגנון מיתוג שונה (ע"י החלפת סדר השכבות) כך שנוצר מתג בעל אופי מיתוג מוליד.

מדידות המתג במצב Off בוצעו במספר מתגים :

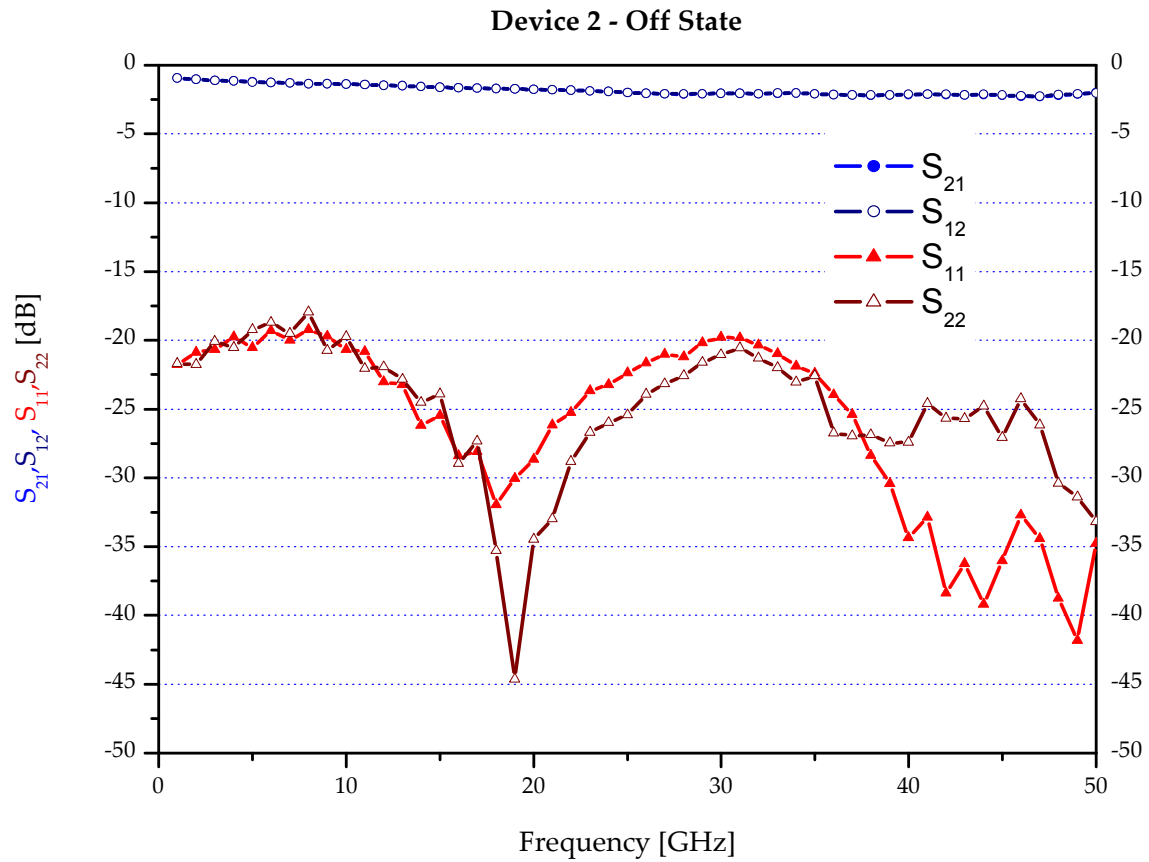


תרשים 41 – פרמטרי פיזור – מתג 1 במצב Off

Figure 39 – S-parameters – Switch 1 in Off State

בתרשים זה נראה בבירור כי ההפסדים של מבנה המתג כולו, ע"ג קו התמסורת קטנים מ-2 dB ובהתחשב בהפסדים הקיימים בקו התמסורת עצמו, ע"י תרשים 33, נראה כי ניתן יהיה לבצע מדידה של הפסדי המתג הבודד.

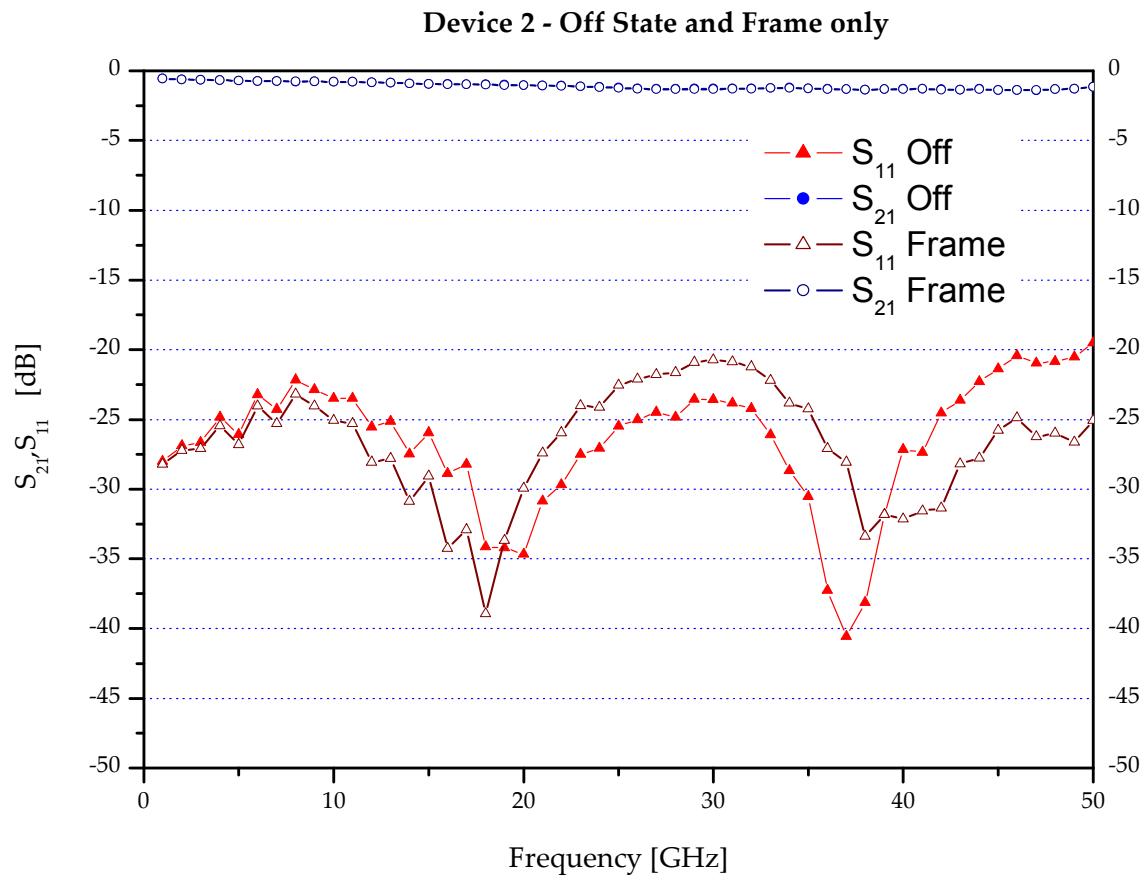
מדידות מתג נוסף, הראו תוצאות דומות :



תרשים 42 – פרמטרי פיזור – מתג 2 במצב Off

Figure 40 – S-parameters – Switch 2 in Off State

כשהתוצאות חוזרות על עצמן ומצביעות על Insertion Loss כללי קטן מ-1.5 dB, בהתאם לתכנ. בכדי למדוד את השפעת המתג בלבד, בוצעה מדידה נוספת לאחר הרס ההתקן, והוצאה פיסית של גוף המתג מתוכו ע"י שבירתו. המדידה הבאה מכילה רק את השפעת מדידת מסגרת המתג.



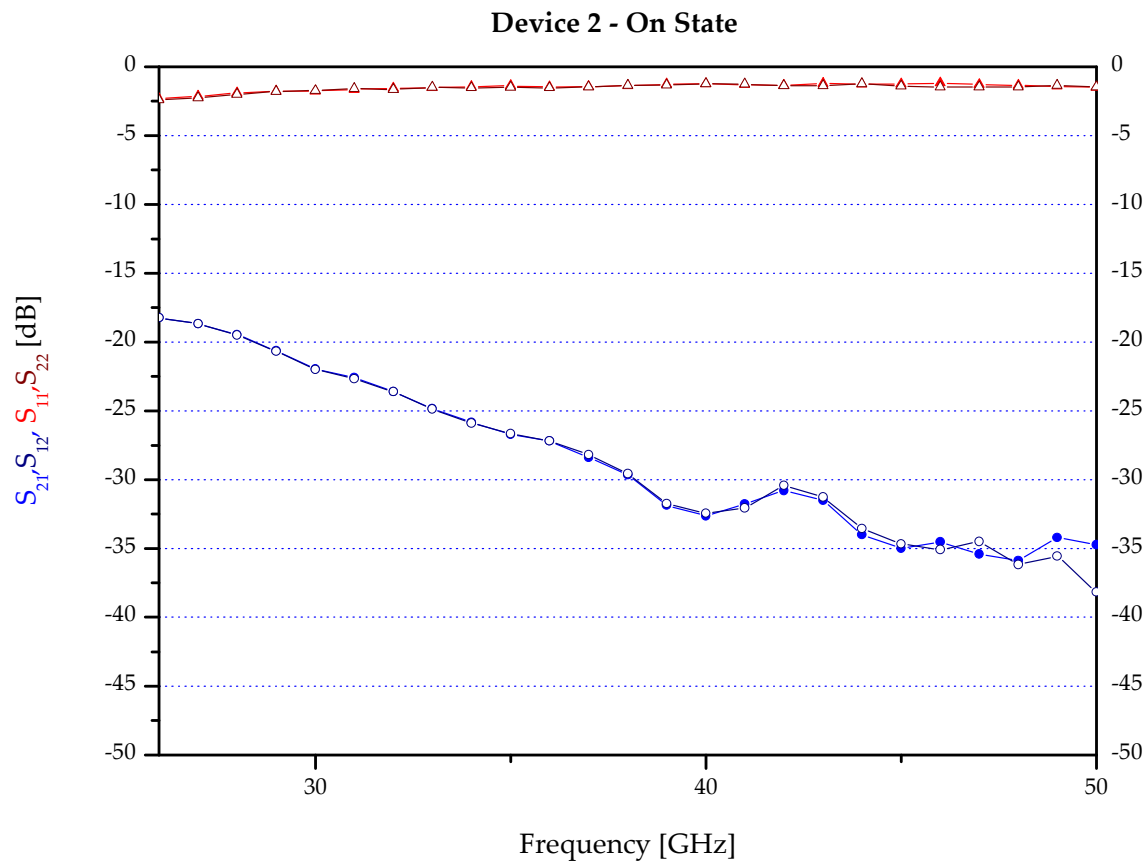
תרשים 43 – השוואת מסגרת עם מתג במצב Off למסגרת ללא מתג

Figure 41 – Handle only vs. Handle and Switch in off state

ההשוואה בין ערכי הפיזור לפני הוצאת המתג ולאחריו מצביעה על הפרש מקסימלי במדידות של כ-0.05dB, ערך המתאים לתכן המתג עצמו.

הערך של כ-1dB-2dB הנובע מהפסדים בעת מעבר הגל מתחת למסגרת הסיליקון של ההתקן, מאפשרים המשך בחינת הרעיון לבצע שימוש בשכבת ה-Handle של הרכיב כמארז סופי, שם ניתן לספוג הפסד הספק זה, במעבר לתוך רכיב המיתוג וביציאה ממנו.

מדידת מצב מופעל במתג מספר 2 (מתג בעל מנגנון מיתוג אוהמי), מצביעות על Isolation גבוה של כ- 18dB
: ~ 30dB



תרשים 44 – פרמטרי פיזור – מתג במצב On

Figure 42 – S-parameters – Switch in On State

מדידה זו מראה את הפוטנציאל הגלום בסוג מתגים זה, כאשר מתקבלת רמת בידוד טובה (קטנה מ 20 dB), על פני רוחב פס רחב מאוד.

מדידות לרכיבים נוספים בוצעו, הן בתחום המדידה המכני והן בתחום התדר הגבוה, כולל מדידות של השפעת המתג על קו התמסורת במתחים הנמוכים ממתח ההפעלה. מדידות אלו ישמשו כבסיס לבניית התקן רב מתגים בעתיד.

מדידות נוספות הקשורות לאמינות/אורך חיים וכן מדידות ההספק המקסימלי בו עומד הרכיב לא בוצעו בשל מספר הרכיבים הקטן יחסית שמומשו בהצלחה במסגרת מחקר זה.

פרק 5 – דיון והסקת מסקנות

בפרק זה יוצג דיון באספקטים שונים של המחקר שבוצע, הן מבחינת הישימות וההתאמה לצרכים המשתנים של תחום המיתוג המכאני והן בפרמטרים הספציפיים של המתג שנמדדו. יוצגו היתרונות והחסרונות שנצפו בעת מימוש ומדידת הרכיב ועקרון המימוש והתחומים הנדרשים להמשך מחקר.

5.1 דיון בישימות עקרון המימוש שנבדק

בספרות הקיימת ובמחקרים המפורסמים בתחום זה, מוצגים מספר כיווני מימוש למתגים מבוססי MEMS. המימוש הנפוץ ביותר מבוסס על טכנולוגית שכבות דקות, בה נבנה המתג על גבי המצע, שכבות שכבות בגישה מונוליטית. מימושים נוספים ע"י שימוש בטכנולוגיות איכול עמוק, אופייניים בעיקר למתגים הנדרשים למרווח תנועה גדול (למשל במתגים אופטיים) ומימושים היברידיים בד"כ אינם מקובלים בשל הטכנולוגיה האינטרדיסציפלינרית הנדרשת.

כאשר נבחנו האתגרים העיקריים העומדים בפני מימוש מתגים מבוססי MEMS לתדר גבוה, עלה נושא האמינות, קרי מספר מחזורי המיתוג, כחסם עקרוני למימוש מערכות מסדר גבוה יותר (המבוססות על מספר מתגים רב) כמו מסיטי פאזה (Phase Shifters), משטחים בעלי סלקטיביות בתדר (Frequency Selective Surfaces) ועוד. הסתבר כי הפרמטרים המשפיעים על נושא האמינות לא נובעים אך ורק ממבנה המתג עצמו (בכל השיטות שצוינו לעיל) אלא גם מצורת האריזה של המתג וחיבורו לעולם החיצון. אופי הפתרון ההיברידי שהתגבש, התבסס על התמודדות עם מספר אתגרי תכנון, בתחום המכאני החשמלי וטכנולוגית המימוש תוך ניסיון לבצע סינרגיה של הפתרונות המוצעים בכדי לגבש קונספט רחב יותר, שיאפשר המשך מימוש רכיבים מסדר גבוה יותר (המכילים מספר מתגים).

הגישה ההיברידית הגורסת שאת המבנה המכני יש לתכנן ולייצר ע"י שימוש בחומר הגלם המתאים ביותר הניבה תוצאות טובות- בעיקר מבחינת גמישות תהליך התכנון. ההתבססות על תכונות חומר ידועות החוזרות על עצמן, הקלו גם על תהליך התכנון המכני וגם על האנליזות והגמישות בתהליך הייצור. חלוקת המשנה המיושמת בארכיטקטורת המתג - בין המבנה העומד בתנועה המכנית, קרי הסיליקון הגבישי, והשכבות המיועדות לפעולת המיתוג החשמלית הניבה גמישות ייצורית, שאפשרה בדיקת מבנה מתג קיבולי ומתג אוהמי תוך שינוי מינימאלי בתהליך וללא שינוי בתכן המכאני ולפיכך ללא שינוי בתכונות האלקטרו-מכניות של המתג קרי זמני תגובה ותדרים עצמיים.

עוד תרומה של צורת המימוש ההיברידית הינה היכולת לאפיין ולשנות את תכונות המתג בצורה קלה יחסית (למשל גובה מרווח המיתוג) ללא שינוי עקרוני של תהליכי הייצור – מאפיין שיאפשר שינוי ממוקד של פרמטרי המתג ליישומים עתידיים, ללא צורך בבחינת ישימות מבנה ו/או תהליך מחדש. עדות נוספת לישימות הקונספט מופיעה במספר מאמרים שפורסמו בעת האחרונה העוסקים במימוש מתגים בגישה זו²⁴ כגישה ישימה להגדלת אמינות המתג בדרך למבנים מרובי מתגים.

5.2 דיון בתכונות שהתקבלו

בבחינה של תכונות הרכיב אל מול יעדי התכן, התקבלה התאמה טובה למדי של הפרמטרים המכאניים, תוך אישוש ההנחה שהפרדת המשתנים בין המכאניקה והתדר גבוה מאפשרים ייצור עפ"י התכנון – בסבב ראשון. פרמטרי התדר הגבוה התאימו בחלקם ליעדים, כאשר אפקט המיתוג בתדר גבוה במצב On – לא סיפק בידוד על פי התכנון. בבדיקות ראשוניות של המתגים הקיבוליים, קשיי תהליך בעת ייצור השכבה הדיאלקטרית הם כנראה הסיבה לקיבול הנמוך מהמתוכנן ולתנובה הנמוכה בעת המימוש. בשלב המימוש של המתגים האוהמיים התקבל בידוד מספק והודגם הפוטנציאל של מבנה מתגים זה.

המבנה ההיברידי והשימוש בטכנולוגית ההשמה, אפשרו בחינה ראשונית של כדאיות האריזה כחלק מתהליך הייצור, והוברר שההפסדים הצפויים קטנים ומאפשרים מימוש מתגים ארוזים בשלבי המחקר הבאים. מאפייני המתג שנמדדו אל מול המאפיינים אליהם כוון התכן מרוכזים בטבלה הבאה, תוך התייחסות להבדלים במידה וקיימים.

פרמטרי מתג כלליים :

תכונה	תכן	מדידות	סיבות לסטייה....
אימפדנס קו תמסורת	50.3 Ω	48 Ω	שימוש בסיליקון בעל התנגדות גבוהה, השפיע על האנליזה והקטין במעט את אימפדנס הקו.
קבוע דיאלקטרי	6.45	5.7	
הפסדים בקו התמסורת	<1.2 dB	<0.7 dB	תוצאה טובה מהמצופה
תדירות עצמית	13 KHz	8.5-11 KHz	עקב שינויים בקבוע הקפיץ ובמסת המתג עם השכבות השונות.
מתח הפעלה	25-35 Volt	25-46 Volt	פיזור רחב בשל שונות במרווח וקבוע קפיץ גבוהה מהמחושב.
מהירות מיתוג	----	150 μ Sec / 1.3mSec	לא חושבה בסימולציות עקב אי וודאות בהקשר לריסון האוויר.

ופ

רמטרי תדר גבוה :

תכונה	תכן	מדידות	סיבות לסטייה....
Insertion Loss	< 0.1 dB	<0.05 db בכל רוחב הפס	במבנה זה להתנגדות ולהשראות השפעה קטנה מאוד על האימפדנס במצב Off.
Isolation	> 26 dB	> 18 dB	המגע אינו מספק והאימפדנס אינו נמוך דיו.

טבלה

11 – השוואת תוצאות מדידות ותכן

Table 11 – Design and measured parameters comparison

לשם מימוש מבנה המתג ההיברידי, נדרש בתחילה מימוש של קו תמסורת לתדר גבוה (Ka Band) שיאפשר בסיס להמשך הבנייה והמדידות. כפי שמודגם בטבלה 11 לעיל, הפרמטרים שהתקבלו ממדידות קו התמסורת מספקות ומהוות סטייה של כ- 3% מהערך שחושב אנליטית. יש לזקוף את השונות לסוג החומר (סיליקון רב התנגדות) ולעובי שכבות הזהב המשפיעות על דיוקי החישוב, לשם מימוש רכיבים נוספים או אף מטריצות מיתוג, ניתן יהיה לעשות שימוש בתאי ספרייה קיימים של יצרני מעגלי MMIC תוך הוספת קווי המוליכים בלבד.

בבחינת הפרמטרים האלקטרו-מכאניים הקשורים לגוף המתג הממומש, ניתן לראות התאמה טובה בתחום מתח ההפעלה כאשר הפיזור מצביע על צורך בדיוק רב יותר של פרמטר המרווח בין המתג לקו התמסורת, כחלק מתהליך ההשמה. ערכי התדר העצמי שהתקבלו נמוכים מהערכים המחושבים, זאת כנראה עקב השפעת שכבת הזהב והמבדד על המסה הכללית של המתג וייתכן שאף על קשיחות החלק המרכזי. חישובי הקפיצים מראים כי המבנה הממומש מאפשר תנועה גדולה (מעל 10 מיקרון) ללא שינוי אופי העמסת הקפיץ ותוך קבלת קבועי קפיץ הדירים – כפי שמתבטא בחזרתיות של הערכים המדודים של התדירות העצמית.

מהירות המיתוג לא חושבה בשל חוסר הדיוק של השפעת גרר האוויר על תנועת המתג. הנתונים שנמדדו מאפשרים את בניית מודל התנועה למבנים דומים בעתיד.

בחינת הפרמטרים הקשורים לתדר הגבוה מצביעים על נתוני Insertion Loss כמצופה, בשל מרווח האוויר הגדול הקיים. ההשפעה של מבנה השכבה המכני (מסגרת המתג) נמדדה והצביעה על ישימות צורת האריזה למתגים ומבנים דומים בעתיד.

פרמטר הבידוד הניב תוצאות מספקות בחלק מרוחב הפס בו תוכנן. הדבר מצביע על קשיים בתכנון אופן המגע של משטחי המוליכים ובאיכות המבדדים שיושמו. בתכן עתידי, צר סרט יחסית, ניתן יהיה לתכן את משטחי המגע לביצועים טובים יותר.

בהסתכלות כוללת על התוצאות, ניתן לומר כי הוכחה היתכנות של עקרון המבנה ההיברידי ושל עקרון הפרדת המשתנים בין התחום המכני לתחום התדר הגבוהה, וניתן לעשות שימוש בתוצאות המחקר לשם המשך פעילות בתחום.

5.3 המלצות להמשך פיתוח

עם הוכחת ההיתכנות וההדגמה של מתגים הממומשים מסיליקון גבישי, תוך שימוש בטכנולוגית השמה מדויקת, כיווני המחקר העתידיים מאפשרים מחקר בשני כיוונים עיקריים:

א. מימוש מתגים על בסיס הקונספט שהוצג, תוך התאמה ספציפית להתקני מיתוג ייעודיים (אנטנות חכמות למשל) ומדידת ביצועים מסדר שני כאמינות, עמידות בהספק אות גבוה וכו'.

ב. בחינת קונספט האריזה האינטגרלי בתהליך הייצור, ובסיוסו לקבלת רכיב שלם, העומד בפני עצמו (למשל SPDT).

ג. בחינת האפשרות למימוש התקנים מסדר גבוה יותר, למשל מסיטי פאזה, תוך שכפול המתג שמומש לקבלת מבנים נוספים.

5.4 סיכום

במסגרת מחקר זה בוצע סקר ספרות מקיף ונלמדו המודלים האנליטיים המתאימים לתהליך תכן מתג לתדר גבוה. במהלך הסקר נבחנו גורמי הכשלים העיקריים המקושרים לטכנולוגיה זו והועלו מספר רעיונות חדשניים לפתרון ושיפור יכולות המיתוג. בעבודה מול קבוצת מיקרוגלים ברפא"ל הוחלט על נקודות עבודה שרירותיות למימוש המתג, מבחינת תחום התדר, מתח ההפעלה וההספק הנדרש - דרישות המקבילות למוצב בפני מערכות מיתוג בטכנולוגית PIN.

ארכיטקטורת הרכיב, הכוללת את צורת קו התמסורת, מבנהו המרחבי, סוג המגע ואופן בנייתו התגבשה במהלך פיתוח רעיונות התכן והתכנסה לבסוף למתג בעל מבנה ייחודי – היברידי, המבוסס על סיליקון גבישי, בניגוד למתגי שכבות דקות המקובלים בספרות. בתהליך הפרטני של תכן המתג, בוצעו אנליזות אנליטיות ונומריות (מבוססות אלמנטים סופיים) בכדי לבחון מבנים גיאומטריים שונים שיספקו הן את הדרישות האלקטרו-מכניות והן את צרכי מיתוג אות ה-RF למרות הדרישות הסותרות לעיתים. תכן זה כלל תכן קו התמסורת, תכן מכני ואלקטרו-מכני וסימולציות תדר גבוה של המבנים השונים.

במקביל ועם סיום התכן הגיאומטרי, בוצע תכן ואפיון תהליכי המימוש שכלל:

- א. מימוש קו תמסורת ומדידות מאפייניו בתדר גבוה.
- ב. אפיון תהליכי איכול יבש עמוק של סיליקון (10 מיקרון)
- ג. ייצור רכיבים מבוססי מצע SOI
- ד. פיתוח תהליך הרכבה וזיווד של הרכיבים כך שיתאימו למתקני המדידה השונים.

לאחר בניית מספר רכיבים, בוצעו מדידות אלקטרו-מכניות, ונמדדו פרמטרי תדר גבוה במצבי מיתוג שונים.

באופן כללי קיימת התאמה טובה בין התכן לתוצאות הרכיבים שמומשו.

ההבדלים הקיימים בתחום הפרמטרים האלקטרו-מכניים, ניתנים להסבר על בסיס שונות בין נתוני חומר הגלם מהנתון בספרות (נתוני מודול יאנג, מקדם פואסון וכו'). הפיזור הנמוך יחסית של המדידות מספק בסיס לשינוי ושיפור הסימולציות, כך שיותאמו לסבב הייצור הבא - בהנחת שימוש בחומר גלם זהה.

נתון ה- Isolation עדיין אינו מספק ונדרש שיפור בעיקר בהגדרת המוליכים ובהבטחת משטחי מגע בעלי התנגדות נמוכה יותר כשהמתג במצב On.

נתון ה- Insertion Loss הנמוך מאשש את עקרון התכן המאפשר מימוש מתג גדול יחסית ללא השפעה על קו התמסורת תוך קיום מרווח אוויר מספק, כיוון מימוש זה מאפשר את ההפרדה בין השדה האלקטרוסטטי המניע את המתג ואזור המיתוג של קו התמסורת בכדי להקטין תופעות של הפעלה עצמית עקב הספק גבוה.

השפעת המסגרת על קו התמסורת – כ- 1dB לכל מעבר של קו התמסורת אל תוך ומחוץ למארז (תרשים 43), מצביע על היתכנות עתידית במימוש הרכיב עם מסגרת מלאה, כך שבעת החיבור היברידי תבוצע גם אריזה אטומה לשם הגדלת אורך החיים של המתג.

מדידות פרמטרי הפיזור בהפעלת מתחי ביניים מאפשרים בחינת כיוון פתרון לבניית Phase Shifter המאפשר הפעלת מתג במתח חלקי לשינוי עכבת קו התמסורת.

עם סיום מחקר זה, נערך סקר ספרות משלים, תוך התמקדות ביכולות המשופרות המוצגות בספרות העולמית, הן מבחינת מכוני המחקר והן מבחינת הגופים העסקיים. כיום מבוצע מירב התכן והפיתוח בניסיון להגדיל את האמינות של הרכיבים הן מבחינת המארזים והן מבחינת סוג האפליקציות^{26,25}.

חברות מסחריות כמו TeraVista²⁷, מציעות כיום מערכי מתגים קיבוליים ומתגים טוריים – לתדירים של עד 7 GHz. חברות בעלות שיוך ביטחוני כמו RadantMEMS מצהירות על עמידה במעל 10 ביליון מחזורי מיתוג ע"י מתג אוהמי טורי²⁸, כשהמטרה הינה העלאת האמינות לאזור ה- 10^{11} מחזורי מיתוג.

הדיון סביב נושא האריזה, בין אם ע"י אריזות הרמטיות של מתגים מבוססים שכבות דקות – Wafer Level Packaging, ובין השמה וחיבור היברידי של מתגים עדיין נמשך. חברות כמו Hymite²⁹ ו-IMEC עוסקות רק בסוגית האריזה של רכיבי MEMS בכלל ורכיבי RF MEMS בפרט, במטרה לספק פתרונות זולים יותר שיקדמו את השימוש ברכיבים אלו גם בתחום של מוצרי צריכה ולא רק במוצרים בטחוניים.

- ¹ G. M. Rebeiz, "RF MEMS, Theory Design and Technology", Wiley, New York, 2003.
- ² Hector J. De Los Santos, "RF MEMS circuit design for wireless communications", Artech House, 2002
- ³ Jae Y. Park, Geun H. Kim, Ki W Chung, Jong U. Bu., "Monolithically integrated micromachines RF MEMS capacitive switches", Sensors and Actuators A 89 (2001) pp. 88-94.
- ⁴ G. M. Rebeiz, J. B. Muldavin, "RF MEMS Switches and switch circuits", IEEE Microwave Magazine, Dec. 2001.
- ⁵ D. Peroulis, S.P. Pacheco, K. Sarabandi, L.P.B Katehi, "ElectroMechanical Considerations in Developing Low-Voltage RF-MEMS Switches", IEEE MTT, Vol 51, pp 259-270, January 2003
- ⁶ J. B. Muldavin, G. M. Rebeiz, "High Isolation CPW MEMS Shunt Switches, Part 1: Modeling", IEEE MTT, December 1999.
- ⁷ S.D. Senturia, "Microsystems design", Kluwer Academic press, 2000.
- ⁸ Nemirovsky, Y., Bochobza-Degani, O.; A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators, Journal of, Microelectromechanical Systems, Vol. 10, No. 4, pp.601 – 615, Dec. 2001.
- ⁹ Maluf, Nadim, An introduction to microelectromechanical systems engineering, Boston, Mass. : Artech House, c2000.
- ¹⁰ V. Milanovic, M. Maharbiz and K. Pister, "Batch transfer integration of RF microrelays", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, pp. 313 –315, Aug. 2000.
- ¹¹ J.B. Muldavin and G.M. Rebeiz, "Inline capacitive and DC -contact MEMS shunt switches", IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., Vol. 11, No. 8, pp. 334-336, August 2001.
- ¹² R. Chan, R. Lesnick, D. Becher, M. Feng, "Low actuation voltage RF MEMS Shunt Switch with cold switching lifetime of seven billion cycles", J. of Microelectromechanical systems, Vol 12, no. 5, October 2003
- ¹³ C. L. Goldsmith, Z. Yao, S. Eshelman, D. Denniston, "Performance of Low-Loss RF MEMS Capacitive Switches", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 8, No. 8, August 1998.
- ¹⁴ R. Irwin, W. Zhang, K. Harsh, Y.C. Lee, "Quick Prototyping of Flip Chip Assembly with MEMS", University of Colorado at Boulder, Internal.
- ¹⁵ Omron Press Release. At www.omron.com
- ¹⁶ C. Goldsmith, J Ehmke, A. Malczewski, B Pillans, S. Eshlman, Z. Yao, M. Eberly, "Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches, IEEE MTT-S Digest, 2001.
- ¹⁷ R. Chan, R. Lesnick, D. Becher, M. Feng, "Low actuation voltage RF MEMS Shunt Switch with cold switching lifetime of seven billion cycles", J. of Microelectromechanical systems, Vol 12, no. 5, October 2003
- ¹⁸ R.N. Simons, "Coplanar Waveguide circuits, Components, And Systems", Wiley-Interscience, 2001
- ¹⁹ B.C. Wadell, "Transmission line design Handbook", Artech House, 1991.
- ²⁰ D. Peroulis, S.P. Pacheco, K. Sarabandi, L.P.B Katehi, "ElectroMechanical Considerations in Developing Low-Voltage RF-MEMS Switches", IEEE MTT, Vol 51, pp 259-270, January 2003
- ²¹ Software - Ansys Multiphysics Ver 7.1, ANSYS Incorporated, USA.
- ²² V. Mikhaelashvili, Y. Betzer, I. Prudnikov, M. Orenstein, D. Ritter and G. Eisenstein, "Electrical Characteristics of Metal-Dielectric-Metal and Metal-Dielectric-Semiconductor Structures based on electron beam evaporated Y_2O_3 , Ta_2O_5 and Al_2O_3 Thin Film", Technion - EE PUB No. 1169, August 1998

²³ J. B. Muldavin, G. M. Rebeiz, "High Isolation CPW MEMS Shunt Switches, Part 1: Modeling", IEEE MTT, December 1999.

²⁴ J. Kim, J. Park, C. Baek, Y.K. Kim, "The SiOG based Single-Crystalline Silicon RF MEMS Switch with Uniform Characteristics", IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 13, No 6. December 2004

²⁵ S. Lucyszyn, " Review of radio frequency microelectromechanical systems technology", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. Vol. 151, No. 2, March 2004

²⁶ J. Jason Yao, "Microelectromechanical system radio frequency switches in a picosatellite mission", *Smart Mater. Struct.* 10 1196-1203

²⁷ TeraVista – at <http://www.teravista.com>

²⁸ RadantMEMS – at <http://www.radantmems.com>

²⁹ Hymite – at <http://www.hymite.com>