# ניסוי גלי מיקרו 25/01/2026

מדריך: אברהם איתן
קבוצה 2, עמדה 2

**רונן מזר** 215966649
ronen.mazar@campus.technion.ac.il

**דן קצוב-פייגין** 323002915
dan.k@campus.technion.ac.il

דו"ח זה נכתב ב-Typst, שפה לכתיבת מסמכים. ניתן לראות את קוד המקור כאן.

# תכונות גלי מיקרו במעבר במקטב ובגלבו ועוצמת הקרינה בקיטובים קווי ומעגלי כתלות בזוויות המשדר והגלאי


**תקציר**

בניסוי השתמשנו במערכת של משדר וגלאי גלי מיקרו עם אורך גל 2.8 ס"מ. תחילה סובבנו את המשדר בקפיצות קבועות ומדדנו את עוצמת הקרינה כתלות בזווית. לאחר מכן הנחנו סריג בין המשדר לגלאי וחזרנו על המדידה. אחר כך במקום הסריג הנחנו גלבו וסובבנו את המשדר לקבלת גל עם קיטובים ניצב ומקביל ללוחות הגלבו, ומדדנו את עוצמת הקרינה כתלות במרחק בין הלוחות. סובבנו את המשדר לקבלת קיטוב ניצב ללוחות, ומדדנו את עוצמת הקרינה בזוויות שונות. החזרנו את המשדר והגלאי לזווית בה הם מקבילים ללוחות הגלבו, ובאמצעות מדידת נקודות מקסימום של עוצמת הגל חישבנו את אורך גל המשודר וקיבלנו $\lambda = 2.96 \pm 0.08\ \mathrm{cm}$. לבסוף, יצרנו קיטובים קווי ומעגלי ומדדנו את עוצמות הקרינה בזוויות שונות.

במדידות של עוצמות הקרינה כתלות בזוויות בקיטובים שונים קיבלנו התאמה טובה לציפייה התיאורטית. אורך הגל שמדדנו תואם בצורה טובה את אורך הגל הנתון במערכת.


## תוכן עניינים


1 מבוא ..... 3
1.1 רקע תיאורטי ..... 3
1.2 מערכת הניסוי ..... 4
2 מהלך הניסוי ..... 7
3 מדידות ..... 7
3.1 חלק I: תכונות סריג כמקטב ..... 7
3.2 חלק II: תכונות גלבו ..... 9
4 סיכום ומסקנות ..... 14
4.1 ניסויי המשך ..... 14
5 נספח: חישוב הקשר בין אורך הגל הנכנס, אורך גל הגלבו, והמרחק בין לוחות הגלבו ..... 15
רשימת מקורות ..... 16

# 1 מבוא

## 1.1 רקע תיאורטי

בניסוי עבדנו עם גלי מיקרו, שהם גלים אלקטרו-מגנטיים בעלי אורך גל גדול יחסית, בסדר גודל של סנטימטרים.

### 1.1.1 קיטוב

**קיטוב** של גל אלקטרו-מגנטי $\vec{E}$ הוא כיוון השדה החשמלי של הגל. בתחילת הניסוי מדדנו את עוצמת הגל הנמדדת כתלות בזווית הקיטוב, ע"י כך שסובבנו את המשדר עצמו. נסמן ב-$\theta_1$ היא הזווית בו סובבנו את המשדר (שהיא גם הזווית בו הסתובב בקיטוב). עוצמת הגל הנקלט היא $\vec{E}^2$, לכן:

$$V \propto \cos(\theta_1)^2 \tag{1}$$

כאשר $V$ הוא המתח [V] שנקלט במד המתח לפי עוצמת הגל הנקלטת בגלאי.

אם נשים סריג בין המשדר לגלאי, האלקטרונים בסריג יפלטו קרינה שתדירותה שווה לתדירות השדה הנפלט מהמשדר, עם פאזה הפוכה ממנו. נסמן את הזווית בין קיטוב הגל לכיוון תילי הסריג ב-$\theta_2$, ואז עוצמת הקרינה הנקלטת בגלאי תהיה:

$$V \propto (\sin^2(\theta_2)) = \sin^4(\theta_2) \tag{2}$$

כלומר, אם הקיטוב מקביל לכיוון התילים, הקרינה הכוללת תתאפס. אם השדה ניצב לסריג, אז $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ ואז האלקטרונים בסריג לא ייצרו שדה כלל, ונקבל רק את הגל כפי שהוא משודר מהמשדר.

### 1.1.2 מעבר גלים אלקטרו-מגנטיים בגלבו

**גלבו** (Waveguide) הוא מבנה מוליך שבאופן אידיאלי גלים יכולים לעבור דרכו בלי לאבד מעוצמתם. בניסוי השתמשנו בגלבו מוגבל במימד אחד הנקרא "קו תמסורת" (Transmission line) המורכבו מזוג לוחות מוליכים מקבילים.

הגלבו מאלץ תנאי שפה במערכת, משום שהשדה החשמלי חייב להתאפס על הלוחות המוליכים.

נתייחס למקרה בו נכנס לגלבו גל שקיטובו בכיוון $\hat{x}$ כבאיור 4. כאשר הגל עובר בגלבו, רכיבי הקיטוב המקביל והניצב מתקדמים במהירויות שונות וצוברים הפרשי מופע. זאת משום שהרכיב הניצב עובר ישר אך הרכיב המקביל צובר הפרשי מופע בכל החזרה מקירות הגלבו. כתוצאה מכך קיטובי הרכיבים יהיו שונים ביציאה מהלגבו. בנוסף, נקבל תבניות התאבכות בתוך הגלבו.

הקשר בין אורך הגל הנכנס, אורך הגל האופייני לגלבו, והמרחק בין לוחות הגלבו, ניתן ע"י הקשר הבא. אם הקיטוב לינארי:

$$\lambda^2\sqrt{4\frac{L}{\lambda}-1} \tag{3}$$

אם הקיטוב מעגלי:

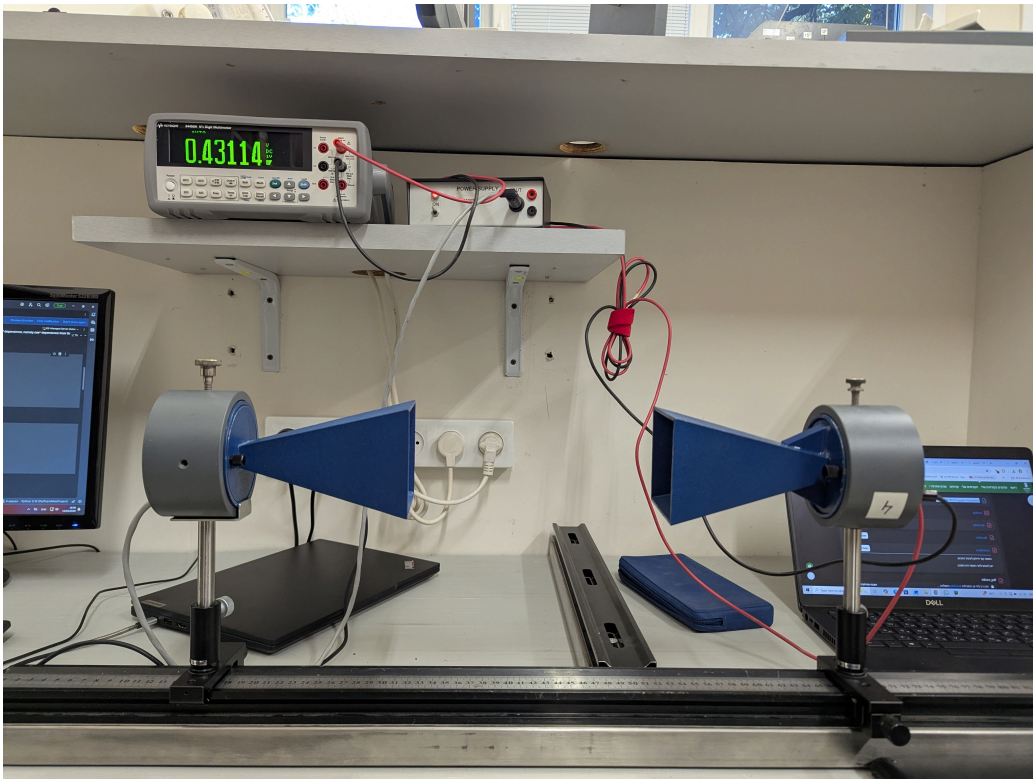
$$\lambda^2\sqrt{8\frac{L}{\lambda}-1} \tag{4}$$

הפיתוח המלא מובא בחלק 5.

[1] את השגיאה הערכנו לפי הספרה האחרונה.

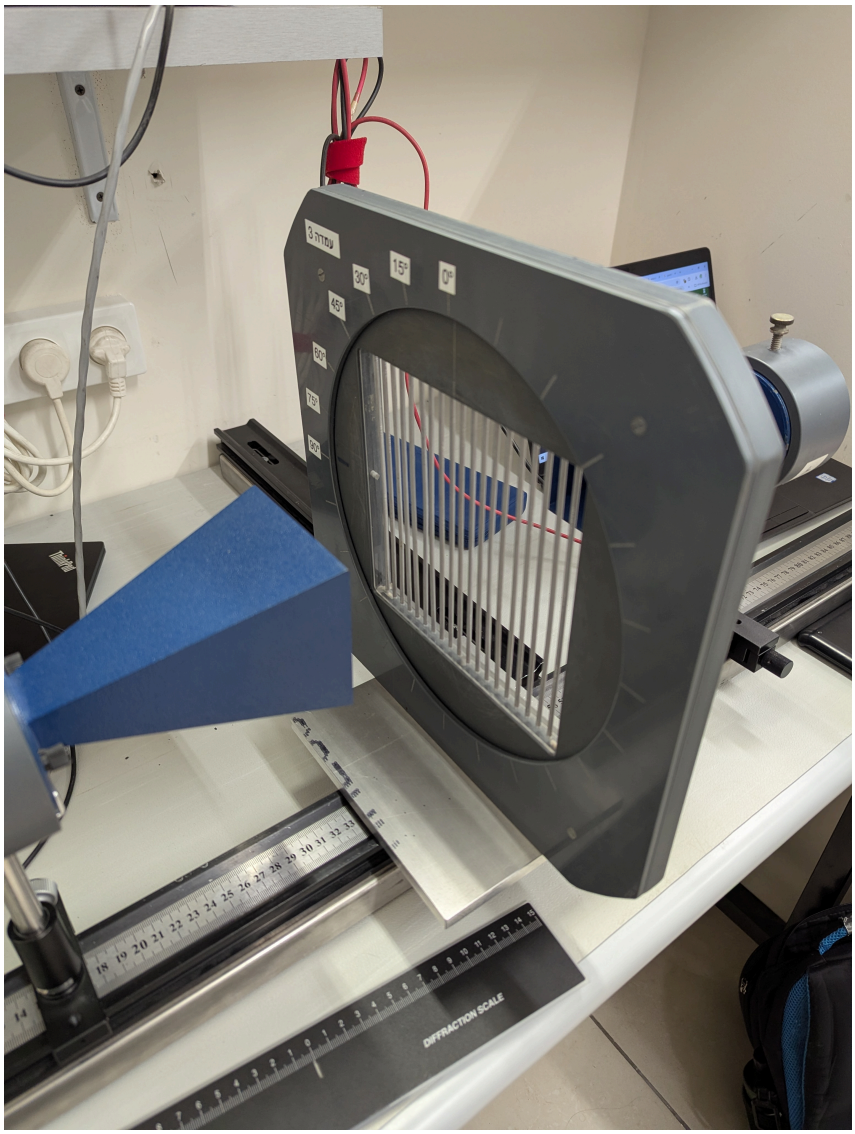
## 1.2 מערכת הניסוי

השתמשנו בניסוי בזוג משדר וגלאי. המשדר שידר גל מיקרו עם אורך גל של $\lambda = 2.8 \pm 0.1\ \mathrm{cm}$[1]. המשדר חובר למקור מתח באמצעותו שידר את הגל, ולגלאי חובר מד מתח, באמצעותו מדדנו את עוצמת הקרינה הנמדדת.



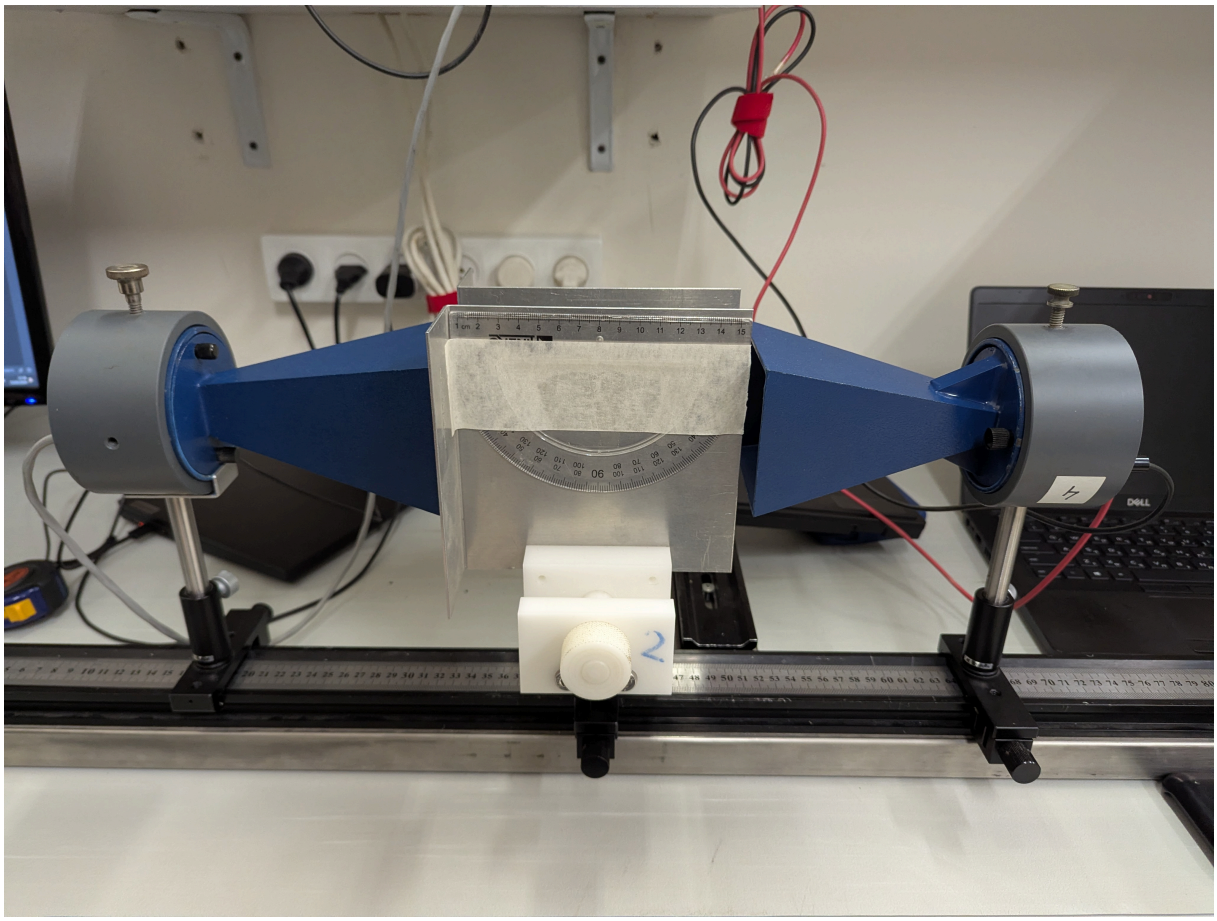

איור 1: המשדר מצד שמאל והגלאי מצד ימין. על המדף נמצא מצד ימין ספק הכוח שחובר למשדר. משמאלו, מד המתח שחובר לגלאי.

הסריג הורכב מסדרת תילים במרחקים קבועים שניתן לסובב את כולם (כמקשה אחת). על הסריג הודבקו מדבקות המסמלות את הזוויות השונות אליהן ניתן לסובב את הסריג.

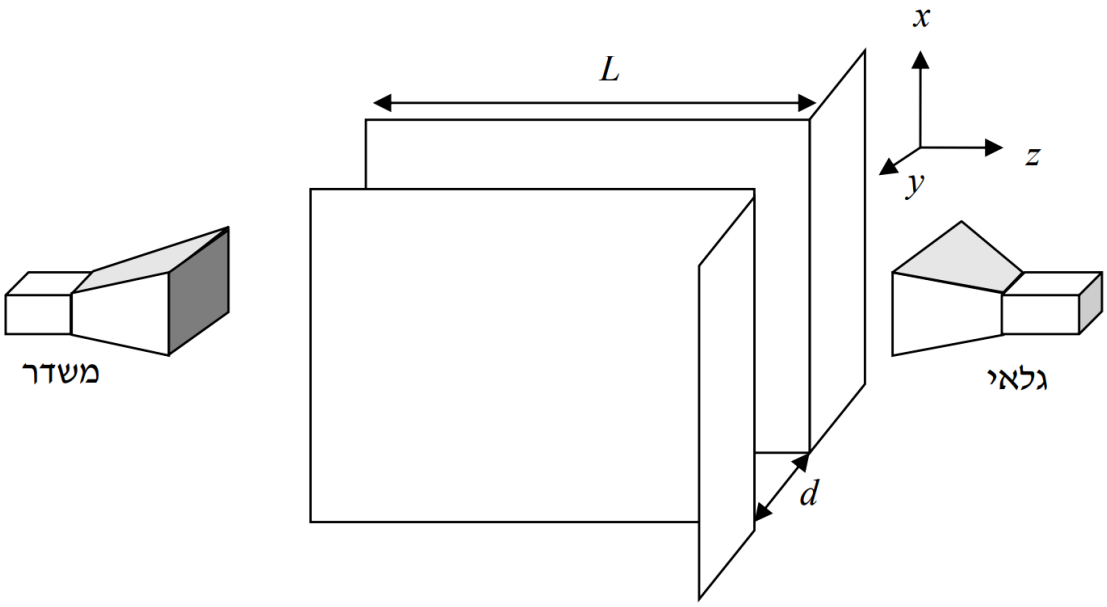



איור 2: הסריג בו השתמשנו בניסוי.

לבסוף חיברנו את הגלבו, שהורכבו משני לוחות מוליכים מקבילים.



איור 3: הגלבו בין המשדר והגלאי. ניתן לראות עליו סרגל באמצעותו מדדנו מרחקים עבור מדידת אורך הגל בגלבו.




איור 4: איור סכמתי של המערכת עם הגלבו ועם מערכת הצירים.

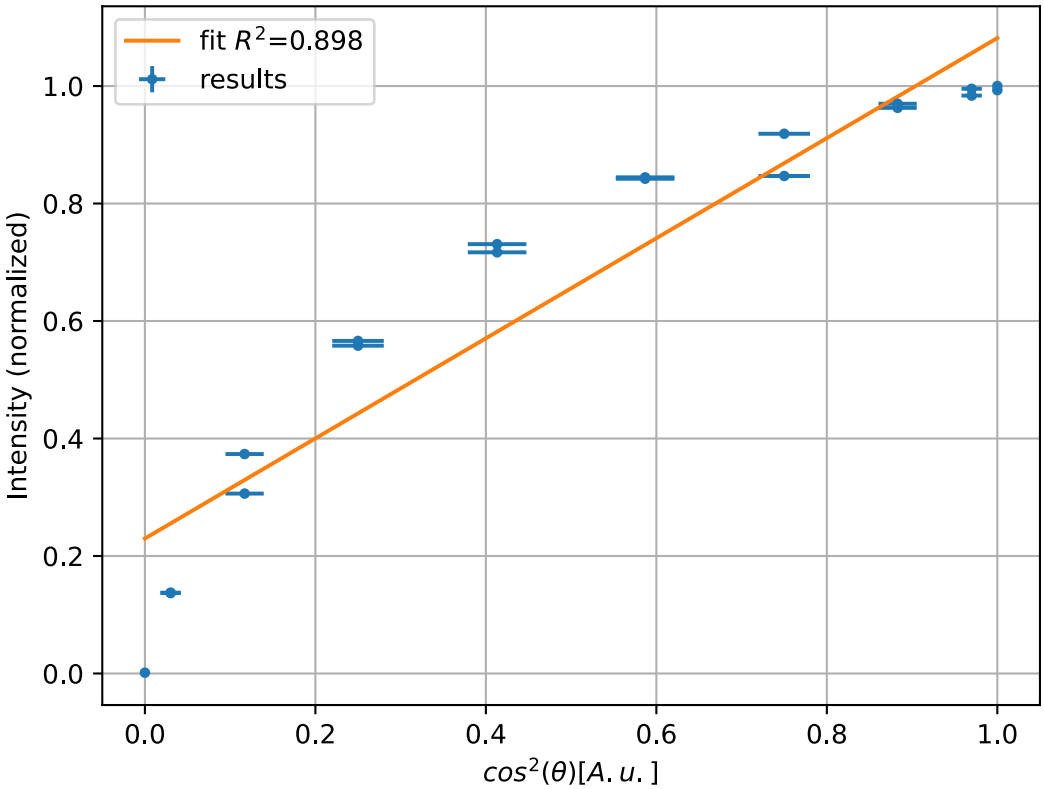
# 2 מהלך הניסוי

# 3 מדידות

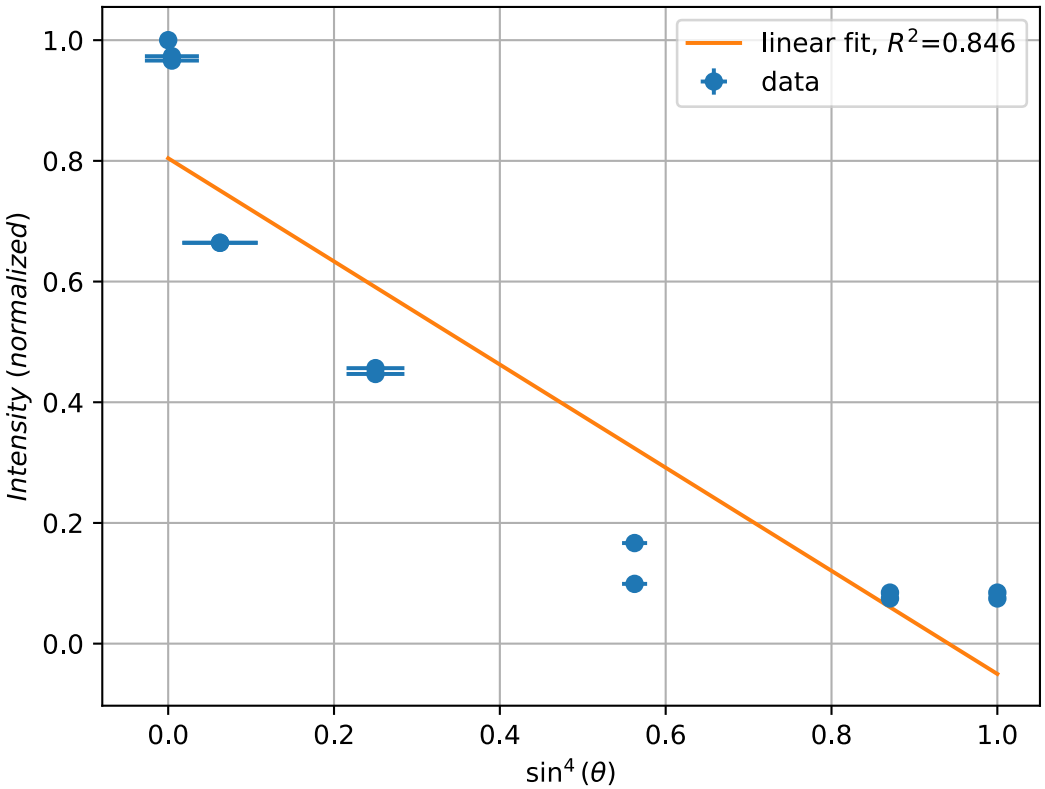
## 3.1 חלק I: תכונות סריג כמקטב

בחלק הראשון של הניסוי השתמשנו רק במשדר ובגלאי, ללא הגלבו. ראשית - קיבענו את הגלאי במקום, וסובבנו את המשדר בקפיצות זווית קבועות. עבור כל זווית מדדנו את עוצמת גל המיקרו שנמדדת בגלאי.

לאחר מכן, קיבענו את הגלאי והמשדר כך שהדיודות שלהן מקבילות זו לזו. הכנסנו בינהם סריג שמישורו מאונך לכיוון התקדמות הגל. סובבנו את הסריג בקפיצות קבועות, ועבור כל זווית מדדנו את עוצמת גל המיקרו שנמדדת בגלאי. להלן התוצאות שהתקבלו:

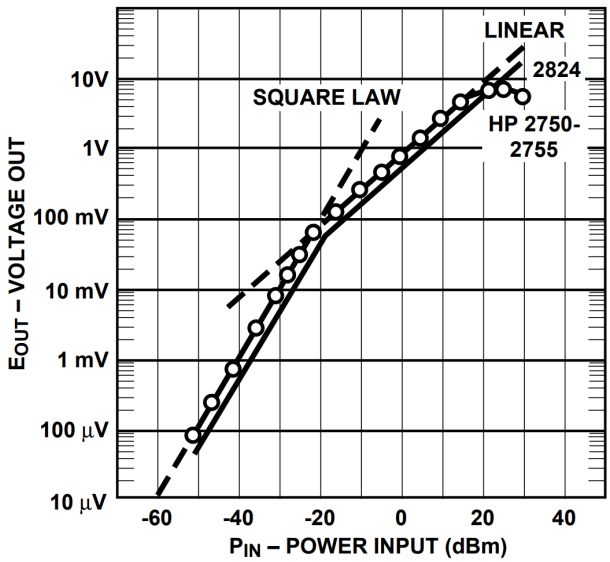



(א) עוצמת הגל הנקלטת בגלאי כתלות בקוסינוס זווית המשדר בריבוע.




איור 5: (ב) עוצמת הגל הנקלטת בגלאי כתלות בסינוס זווית הסריג ברביעית.

בשני הגרפים קיבלנו ערכי התאמה $R^2$ של $0.898$ ו-$0.846$ בהתאמה, שמראים על התאמה סבירה לתיאוריה. ניתן בשני הגרפים לראות שיש חוסר לינאריות (קעירות). בגלאים מבוססים דיודה יש טווח עוצמות (מעל עשרות mV) בו המתח פרופורציונלי לשדה ($V \propto E \propto \sqrt{I}$) ולא ל-$I$ כפי שהנחנו לאורך כל הטווח. למרות שלא הצלחנו למצוא מידע לגבי מערכת הניסוי הספציפית בה השתמשנו, אנו מעריכים כי תופעה זו קיימת גם בגלאי בו השתמשנו.



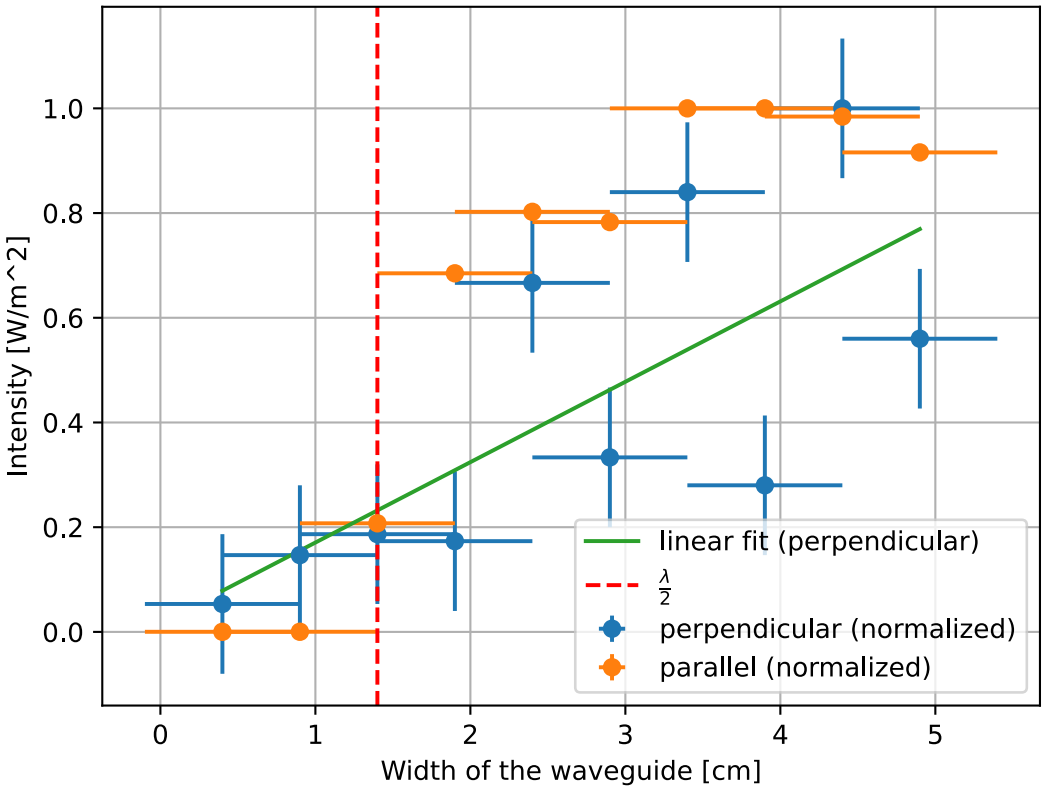

איור 6: גרף מתוך מדריך של דיודת גלאי של יצרן אחר של מתח נמדד כתלות בעוצמת האות הנכנס. ניתן לראות כי בעוצמות נמוכות הקשר ריבועי, אך בעוצמות גבוהות יותר הקשר הופך לינארי. נלקח מ-[1].

ניתן לראות כי בגרף ה-$\cos^2(\theta)$ הגרף קמור, וזאת כי בפועל ברוב הטווח הציר האנכי פרופורציונלי ל-$\cos\theta$. לכן הגרף יהיה בצורת פונקציית השורש.

הגרף השני קעור כלפי מטה ומתנהג כמו $Y = 1 - \sqrt{X}$, שכן זהו הקשר בין $\sin^4(\theta)$ בציר האופקי ל-$\cos^2(\theta)$ בציר האנכי בו רשומה עוצמת הקרינה.

### 3.2 חלק II: תכונות גלבו

בחלק השני של הניסוי הסרנו את הסריג בין הגלאי והמשדר, והרכבנו את הגלבו במקומו. כיוונו את המשדר כך שהקיטוב של הגל שהוא מייצר יהיה בניצב ללוחות הגלבו. שינינו את המרחק בין הלוחות מספר פעמים ומדדנו את עוצמת הגל הנקלטת בגלאי (שמוקם במקביל ללוחות הגלבו) עבור כל מרחק. חזרנו על התהליך עם קיטוב מקביל ללוחות הגלבו. להלן התוצאות:

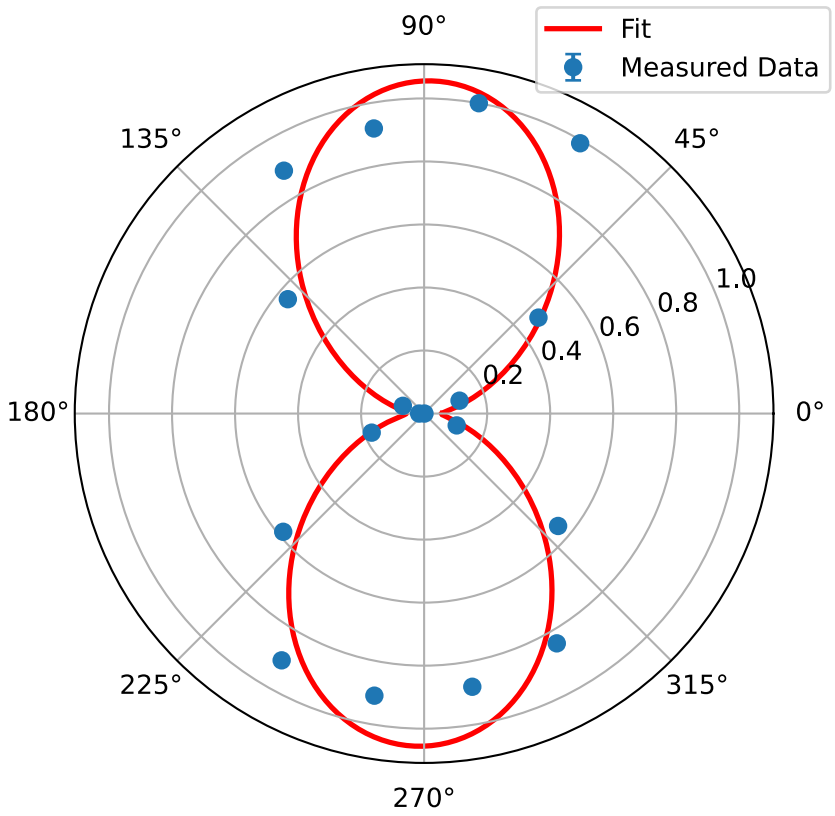



איור 7: בכתום, עוצמת הגל הנקלטת כתלות במרחק בין הלוחות עבור קיטוב מקביל. בכחול, עוצמת הגל הנקלט כתלות במרחק בין הלוחות עבור קיטוב ניצב. בירוק, התאמה לינארית לתלות בין העוצמה למרחק עבור הקיטוב הניצב. קיבלנו $R^2 = 0.515$, שמצביע על התאמה לינארית חלשה יחסית למדידות שלנו.

כפי שניתן לראות, אמנם ניתן לראות עלייה הדרגתית בגרף הקיטוב המקביל כמצופה מהתיאוריה. אולם, ההתאמה הלינארית שקיבלנו חלשה. אנחנו חושבים שזה קרה בגלל גודל האי-וודאות בחלק זה בניסוי: ניתן לראות שהאי-ודאות במרחק בין לוחות הגלבו במדידותינו הינה גדולה יחסית לסדר הגודל של האורכים שנמדדו, כ- $18.9\%$ בממוצע מהמרחק הנמדד. בנוסף, שמנו לב שבזמן ששינינו את המרחק בין הלוחות, הם קיבלו לפעמים זווית גדולה בינהם, שהפרה את ההנחה שהלוחות מקבילים.

אפשר לראות שבמקרה שבו הקיטוב של הגל המוכנס מאונך ללוחות הגלבו יש ירידה משמעותית בעוצמה היחסית הנמדדת של הגל הנפלט מהגלבו כאשר המרחק בין הלוחות יורד לפחות מחצי אורך גל המיקרו המוכנס, כצפוי מהתיאוריה.

לאחר מכן כיוונו את המשדר חזרה לזווית שבה הוא מייצר גל עם קיטוב ניצב ללוחות, קיבענו את המרחק בין הלוחות, ומדדנו את עוצמת הגל שנקלטת בגלאי בזוויות שונות של הגלאי. להלן התוצאות:

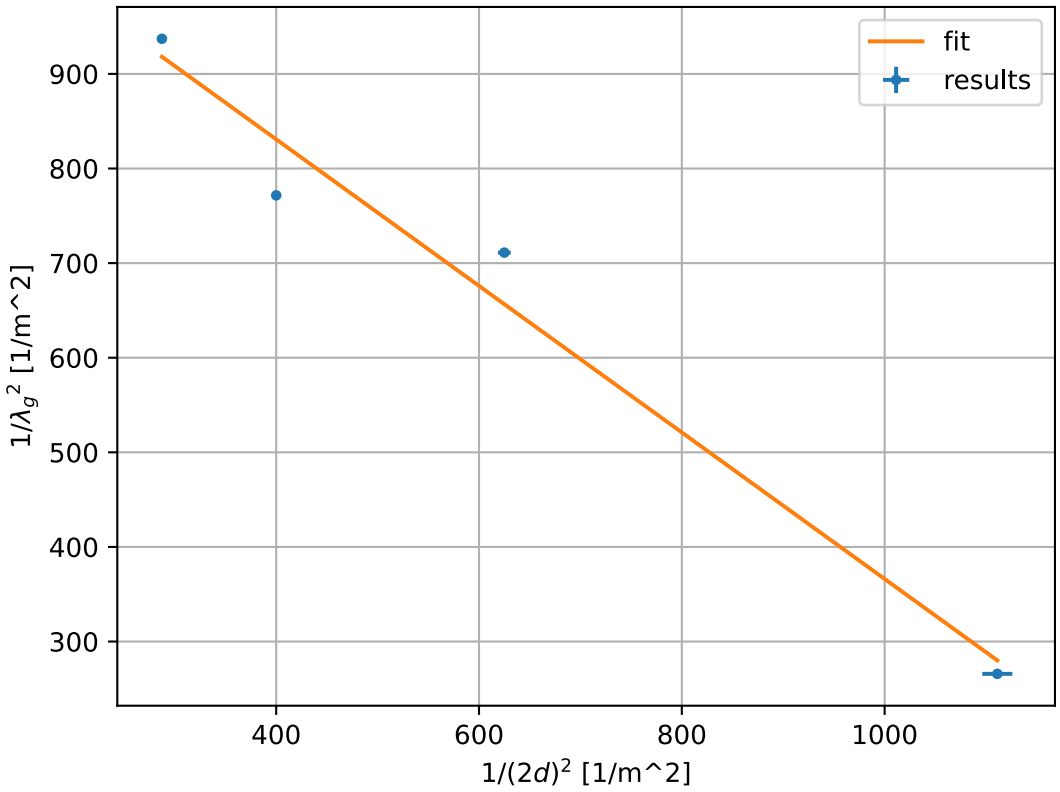



איור 8: עוצמת הגל הנקלט כתלות בזווית המשדר. ערך ההתאמה $R^2 = 0.94$ מעיד על התאמה טובה לתיאוריה, וניתן לראות לפי צורת הגרף שהתקבל כי הקיטוב לינארי.

ניתן לראות כי צורת הקיטוב המתקבלת הינה באמת לינארית וקיימת התאמה חזקה יחסית בין התוצאות המדודות שלנו לרגרסיה מבוססת התיאוריה שמוצגת בגרף.

### 3.2.1 מדידת אורך גל הגלבו

אחר כך, החזרנו את הגלאי ואת המשדר לזווית שבה הם מקבילים ללוחות הגלבו. חיברנו את לוח הפרספקס לגלבו והזזנו אותו לאורך הגלבו וחיפשנו נקודות מקסימום מקומיות בעוצמת הגל הנקלט כתלות במיקום הלוח. השתמשנו במרחקים בינהם כדי לחשב את $\lambda_g$. חזרנו על התהליך הנ"ל מספר פעמים עבור מרחקים שונים בין הלוחות. להלן כל $\lambda_g$ שחישבנו יחד עם המרחק בין הלוחות שמתאים לו:

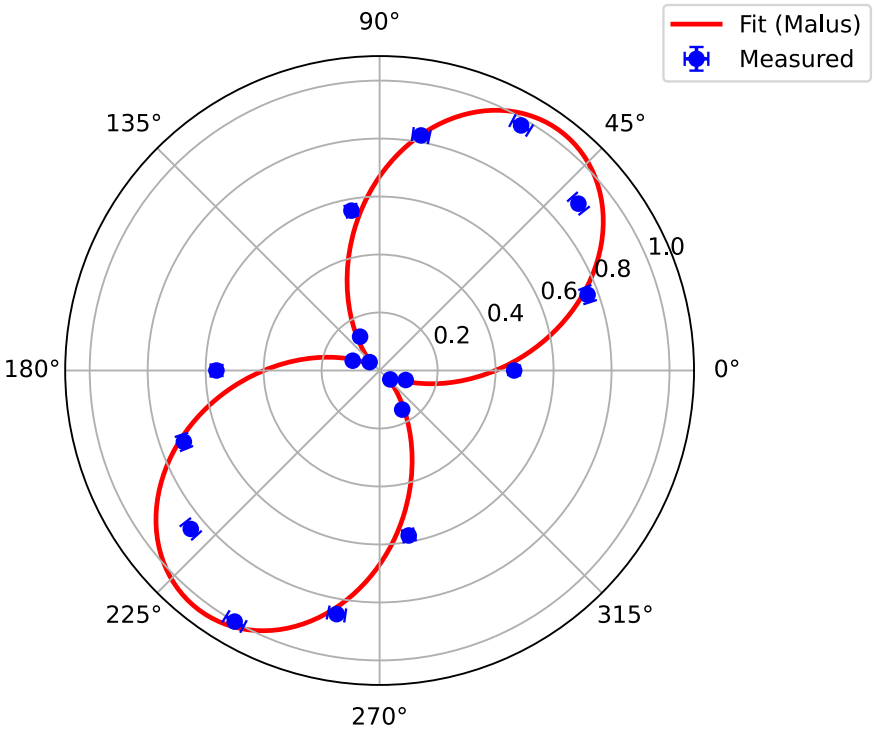



איור 9: אחד חלקי אורך הגל העומד בריבוע כתלות באחד חלקי המרחק בין הלוחות בריבוע.

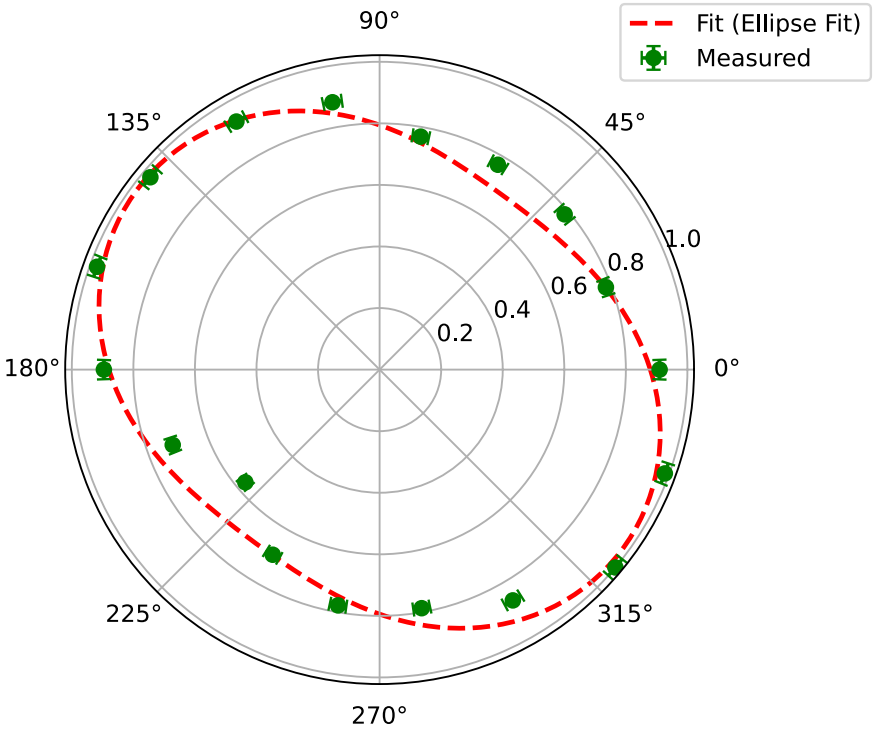
ניתן להשתמש בהתאמה הלינארית שלנו כדי לחשב את אורך גל המיקרו שהמשדר פולט: בעזרת השוואה התלות לינארית המוצגת בתלות הלינארית שאפשר לראות במשוואה 6, ניתן לראות שאורך הגל שהמשדר פולט, $\lambda$, הוא $\frac{1}{\sqrt{b}}$, כאשר $b$ הוא החיתוך של ההתאמה הלינארית שלנו בציר האנכי. לאחר הצבה נקבל כי $\lambda = 2.96 \pm 0.08$ cm. נחשב ונקבל כי ה z-score לערך זה יחסית לערך התיאורטי שנתון לנו, $\lambda = 2.8$ cm הוא $1.25$ , שזו סטייה קטנה מהערך התיאורטי.

### 3.2.2 עוצמת הקרינה כתלות בזווית הסיבוב בקיטובים מעגלי וקווי

לבסוף, מיקמנו את המשדר כך שהוא מייצר גל עם קיטוב בזווית של $45°$ ביחס ללוחות הגלבו. בעזרת משוואה 10 חישבנו את המרחק בין הלוחות שאמור תאורטית לפלוט לנו קיטוב מעגלי ביציאה מהגלבו וקיבענו בו את הלוחות. מדדנו את עוצמת הגל הנקלט בגלאי במספר זוויות שונות של הגלאי ביחס לגלבו. חזרנו על תהליך זה עבור המרחק התיאורטי בין הלוחות שאמור להניב קיטוב קווי ביציאה מהגלבו שחישבנו בעזרת משוואה 13. להלן התוצאות:




,




איור 10: בגרף העליון ניתן לראות את עוצמת הגל הנקלט בגלאי כתלות בזווית הגלבו עבור גל בעל קיטוב לינארי, ובגרף התחתון ניתן לראות את עוצמת הגל הנקלט בגלאי כתלות בזווית הגלבו עבור גל בעל קיטוב מעגלי. ה-$R^2$ עבור הגרף העליון הוא $0.9633$ ועבור הגרף התחתון הוא $0.7951$. זה מראה על התאמה סבירה יחסית לציפיה התיאורטית שלנו על צורת הקיטוב.

ניתן לראות שהקיטוב שהתקבל כאשר לוחות הגלבו אמורים לפלוט קיטוב לינארי הוא אכן בעל הצורה האופיינית לקיטוב זה, עם התאמה חזקה לרגרסיה המתאימה לו. הקיטוב שמתקבל כאשר לוחות הגלבו אמורים לפלוט קיטוב מעגלי לעומת זאת, אינו כל כך מדמה את צורת הקיטוב המעגלי: ניתן לראות שהצורה המתקבלת היא אליפטית. אנחנו מאמינים שהסיבה לכך היא בשל כך שהמרחק בין הלוחות שדרוש לנו לקבלת קיטוב מעגלי הוא מוערך, וכן בעל אי-וודאות מסויימת. בנוסף, מעגל מושלם היה מתקבל רק אם שני התנאים הבאים היו מתקיים:

1. הזוויות בין הרכיבים האנכי והאופקי של הקיטוב הייתה בדיוק $45°$ שהיה מוביל להפרש מופע של $\pi/2$ כנדרש.
2. הנחנו בתיאוריה שעוצמות הרכיבים המקביל והניצב לא דועכות כלל.

בהכרח הייתה סטייה מסוימת בזווית בין הרכיבים, ובפועל הגלבו לא אידיאלי והרכיב המקביל שעובר החזרות מקירות הגלבו דועך יותר מהניצב. לכן, קיבלנו "מריחה" של המעגל לאליפסה. בנוסף יכול להיות שהסיבות האפשריות ששקלנו קודם לסטייות שלנו מהתיאוריה: זווית הסטיה של הלוחות וחוסר דיוק הגלאי במדידת העוצמה בעוצמות גבוהות באים לידי ביטוי גם כאן.

# 4 סיכום ומסקנות

בניסוי חקרנו תכונות שונות של גלי מיקרו בנוכחות סריג וגלבו. אישששנו את היחס בין זווית הסיבוב של המשדר לעומת עוצמת הקרינה הנמדדת. בעוצמות גבוהות קיבלנו גרף קעור אשר ניתן להסביר בגלל אופי הפעולה של דיודת הגולי שמשנה את היחס מריבועי ללינארי בעוצמות גבוהות. באמצעות מדידת גלים עומדים בגלבו חישבנו את אורך הגל המשודר, $\lambda = 2.96 \pm 0.08\ \mathrm{cm}$, ערך הקרוב לערך הנתון. בעזרת הגרפים הפולאריים ראינו כי הצלחנו ליצור קיטובים קווי ומעגלי בגלבו.

במדידת העוצמות של הגל העובר בגלבו כתלות במרחק בין לוחותיו, קיבלנו שגיאת מדידה גדולה והתאמה חלשה לתיאוריה. עם זאת, כן ראינו את מגמת העלייה הצפוייה וירידה גדולה בעוצמה הנקלטת בקיטוב מקביל כאשר המרחק בין הלוחות היה קטן מחצי אורך הגל המשודר. אנו מעריכים כי קיבלנו התאמה חלשה בגלל הקושי בביצוע במדידה מדויקת של המרחקים והעובדה שלוחות הגלבו בפועל לא היו מקבילים.

## 4.1 ניסויי המשך

היינו שמחים לחזור על הניסוי שוב עם מערכת מדויקת, במיוחד עם מדידת עוצמה מדויקת יותר ומרחקים, בעיקר מדידת המרחקים בין לוחות הגלבו.

מעניין גם להישאר דווקא עם המערכת הקיימת, ולנסות לראות את הקשר בין עוצמת הגל הנפלטת לעוצמת הגל הנמדדת, ולראות באיזה טווחים הקשר הנ"ל לינארי ומתי הוא ריבועי. אפשר גם לנסות לבצע ניסוי עם גלבו בעל אורך מודולרי, לנסות להעביר בגלבו גל AM או גל אחר נושא אינפורמציה, ולראות איך האינפורמציה הזו נקלטת בסוף הגלבו כתלות בצורה ובאורך שלו. המטרה היא לשחזר את עיקרון הפעולה של סיבים אופטיים.

## 5 נספח: חישוב הקשר בין אורך הגל הנכנס, אורך גל הגלבו, והמרחק בין לוחות הגלבו

בפיתוח נתבסס על הנוסחה המובאת בתדריך, ונציב את הערכים הרלוונטיים לניסוי שלנו ($\lambda = 2.8\text{cm}$ אורך גל המיקרו, $L = 15.2 \pm 0.1$ cm אורך הגלבו):

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{(2d)^2} + \frac{1}{\lambda_g^2} \Rightarrow \lambda = \sqrt{\frac{\left(2d\lambda_g\right)^2}{(2d)^2 + \lambda_g^2}} = \frac{2d\lambda_g}{\sqrt{4d^2 + \lambda_g^2}} \tag{5}$$

$$\Delta\phi = 2\pi L\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_g}\right) \tag{6}$$

עבור קיטוב מעגלי:

$$\begin{gathered}\frac{1}{2}n + n\pi = 2\pi L\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_g}\right) \Rightarrow \frac{1}{4L} + \frac{n}{2L} = \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_g} \Rightarrow \\ \lambda_g = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} - \frac{1+2n}{4L}} = \frac{4L\lambda}{4L - (2n+1)\lambda}\end{gathered} \tag{7}$$

נמצא כעת את $d$, המרחק הדרוש בין הלוחות על מנת לקבל קיטוב מעגלי.

$$d = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\left(\lambda\lambda_g\right)^2}{\lambda_g^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{2}\frac{\lambda\lambda_g}{\sqrt{\lambda_g^2 - \lambda^2}} \tag{8}$$

נציב את הערך שמצאנו עבור $\lambda_g$:

$$d = 2\frac{L}{\sqrt{(2n+1)\left(8\frac{L}{\lambda} - (2n+1)\right)}} = 2\frac{L}{\sqrt{(2n+1)\left(8\frac{L}{\lambda} - (2n+1)\right)}} \tag{9}$$

נציב $n = 0$ ונקבל:

$$\boxed{d_{\text{circular}} = \frac{2L}{\sqrt{8\frac{L}{\lambda} - 1}} = 4.667 \pm 0.015 \text{ cm}} \tag{10}$$

כעת נחשב עבור קיטוב לינארי.

$$n\pi = 2\pi L\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_g}\right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} - \frac{n}{2L} = \frac{1}{\lambda_g} \Rightarrow \lambda_g = \frac{2\lambda L}{2L - \lambda n} \Rightarrow \tag{11}$$

$$d = \frac{1}{2}\frac{\lambda\lambda_g}{\sqrt{\lambda_g^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{2}\frac{2L\lambda^2}{\sqrt{(2\lambda L)^2 - \lambda^2(2L - \lambda n)^2}} = \frac{L}{\sqrt{n\left(4\frac{L}{\lambda} - n\right)}} \tag{12}$$

נציב $n = 1$ ונקבל:

$$\boxed{d_{\text{linear}} = \frac{L}{\sqrt{4\frac{L}{\lambda} - 1}} = 3.34 \pm 0.01 \text{ cm}} \tag{13}$$

# רשימת מקורות


[1] "Diode Detector Characteristics and Applications".

[2] J. K. Rowling, Harry Potter and the Order of the Phoenix, כרך 5. 2003, עמ' 768.

[3] Ishkur, "Ishkur's Guide to Electronic Music". [מקוון]. זמין ב: http://www.techno.org/electronic-music-guide/