

האפקט האקוסטו-אופטי

א. מילות מפתח

גלים אל"מ, גל אקוסטי, גל עומד, תדירות, גביש PZT, אינטראקציה עם חומר, אופטיקה גיאומטרית, אופטיקת פורייה, שדה קרוב, שדה רחוק, סריג, תנאי שפה, מהירות הקול.

ב. מכשור

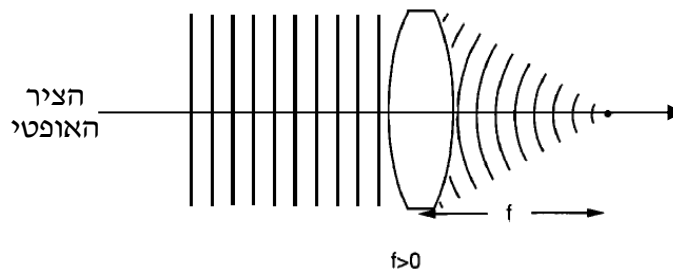
ספק מתח, לייזר He-Ne בעל אורך גל $\lambda = 6328\text{\AA}$, מנחת, עדשות, תא אקוסטי בגודל $62\text{mm} \times 52\text{mm}$, גביש PZT, מחולל תדר, מצלמת CCD, מחשב.

ג. מבוא

1. אופטיקה גיאומטרית, שדה קרוב, שדה רחוק

בניסוי זה יש להכיר מספר ביטויים ומונחים בסיסיים באופטיקה, הן אופטיקה גיאומטרית והן אופטיקת פורייה. כאן רק נרענן ונחדד את העיקר (ראו קורס "גלים" ומקורות בסוף התדריך להעמקה נוספת).

אופטיקה גיאומטרית מתארת את התקדמות האור בקווים ישרים (קרני אור) על פי מספר עקרונות פשוטים. ניתן להסיח קרן אור ע"י שימוש בעדשה וכן ליצור מיקוד או פיזור של הקרן בהתאם לצורת העדשה. במקרה של עדשה יחידה (סינגלט) נוכל ליצור מיקוד (ריכוז) באמצעות עדשה מרכזת קמורה (ראו איור 1) או חצי קמורה, או פיזור קרניים באמצעות עדשה קעורה או חצי קעורה. כאשר קרני האור מגיעות במקביל לציר האופטי הן ממוקדות בנקודת (מרחק/ אורך) מוקד העדשה הנמצא על הציר האופטי של העדשה. בניסוי זה נשתמש ב3 עדשות מרכזות.



איור 1: סכמת עדשה מרכזת

מקור האור בניסוי הינו לייזר He-Ne בעל אורך גל $\lambda = 6328\text{\AA}$ המוציא אלומה מקבילה עד כדי סטייה קטנה. מכיוון שאלומת הלייזר אינה בעלת מפתח קבוע, אלא בעלת סטייה beam divergence $= 1.7\text{ }\mu\text{rad}$ עלינו לתקן זאת בעזרת מערכת עדשות קמורות ℓ_1 ו ℓ_2 בעלות מרחקי מוקד f_1 ו f_2 , בהתאמה, כך שהמרחק ביניהן, $f_1 + f_2$, מפצה על ה beam divergence. אפקט נוסף שמתקבל בשימוש בעדשה הינו הגדלה של מפתח הקרן והוא תלוי במרחק העצם מהעדשה, S , ובמרחק המוקד של העדשה, \tilde{f} , וגודלו $M = \frac{\tilde{f}}{\tilde{f}-S}$. למעשה מערכת העדשות לא רק מיישרת את מפתח הקרן היוצאת מהלייזר אלא גם מגדילה אותו. בהתאם לנתוני המערכת בניסוי נבחר בעדשות ℓ_1 ו ℓ_2 בעלות מרחקי מוקד $f_1 \approx 35\text{mm}$ ו $f_2 \approx 300\text{mm}$, בהתאמה. במערכת זו מתקבלת הגדלה של מפתח הקרן (aperture) מ- 1mm עד ל $4-5\text{mm}$.

באופטיקת פורייה (בניגוד לאופטיקה גיאומטרית) נתייחס להתקדמות האור כאל סופרפוזיציה של חזיתות גל מישוריות (ולא קרן ישרה) עליהן נתבונן בשני תחומים :

1. תחום השדה הקרוב (NF-Near Field) בו תתקבל תבנית פרנל Fresnel,
2. תחום השדה הרחוק (FF-Far Field) בו תתקבל תבנית עקיפת פראונהופר (Fraunhofer).

קרוב רחוק ביחס למה? לשם כך הוגדר מספר פרנל :

$$F = \frac{W^2}{L\lambda} \quad (1)$$

כאשר W הינו המפתח (aperture) ממנו מתפשט האור, L הינו המרחק מהמפתח ועד המסך/חיישן ו- λ הוא אורך הגל של הקרן.

- עבור $F \gg 1$, כלומר המרחק מהמפתח למסך שווה ערך לגודל המפתח, זהו תחום **השדה הקרוב** בו נוכל לצפות בשינויי הפאזה של הגל וכן ישנה תלות חזקה במרחק בו אנו נמצאים.
- עבור $F \ll 1$, כלומר המרחק מהמפתח למסך גדול בהרבה מגודל המפתח, זהו תחום **השדה הרחוק** בו נאבד מידע על פאזות חזית הגל ונוכל להתבונן בתמונת העקיפה.

בניסוי שלנו נתעניין בתמונה העקיפה המתקבלת לאחר התא האקוסטי במרחק L של עד 50cm מתא אקוסטי. כאמור, מפתח הקרן לאחר מערכת העדשות המיישרות הינו מספר מילימטרים ($\sim 4 - 5\text{mm}$) ולכן מתקבל שבניסוי זה תמיד מתקיים $F > 1$ ותתאפשר מדידה בתחום השדה הקרוב.

למעשה, בכדי לראות את תמונת העקיפה בשדה רחוק (ב"אינסוף") עלינו להיעזר בעדשה מרכזת ℓ_3 בעלת מרחק מוקד התואם את מימדי המערכת. עדשה זו תיצור התמרת פורייה של התמונה בה אנו מעוניינים, תמונת קרן האור המתקדמת לאחר אינטראקציה עם התווך בתא האקוסטי, ותפרק אותה לגלים מישוריים. בניסוי זה מרחק המוקד של ℓ_3 הינו בקרוב $f_3 \approx 300mm$.

2. האפקט האקוסטו-אופטי

גלי הקול הם הפרעה בצפיפות ובלחץ בחומר. אלו הם גלים אורכיים אשר מקיימים את משוואת הגלים ולכן אפשר לצפות בהם בכל התופעות הגליות כגון גלים עומדים, התאבכות, עקיפה ועוד. אם גל בעל משרעת a , אורך גל $\tilde{\lambda}$, תדירות f ומופע קבוע ϕ_0 , מתפשט לאורך ציר \hat{x} אפשר לתאר את ההפרעה $y(x, t)$ על ידי:

$$y(x, t) = a \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\tilde{\lambda}} - ft \right) + \phi_0 \right] \quad (2)$$

מהירות הפאזה v של גל בעל תדר f ואורך גל $\tilde{\lambda}$ (כך שהפאזה תישאר קבועה) הינה:

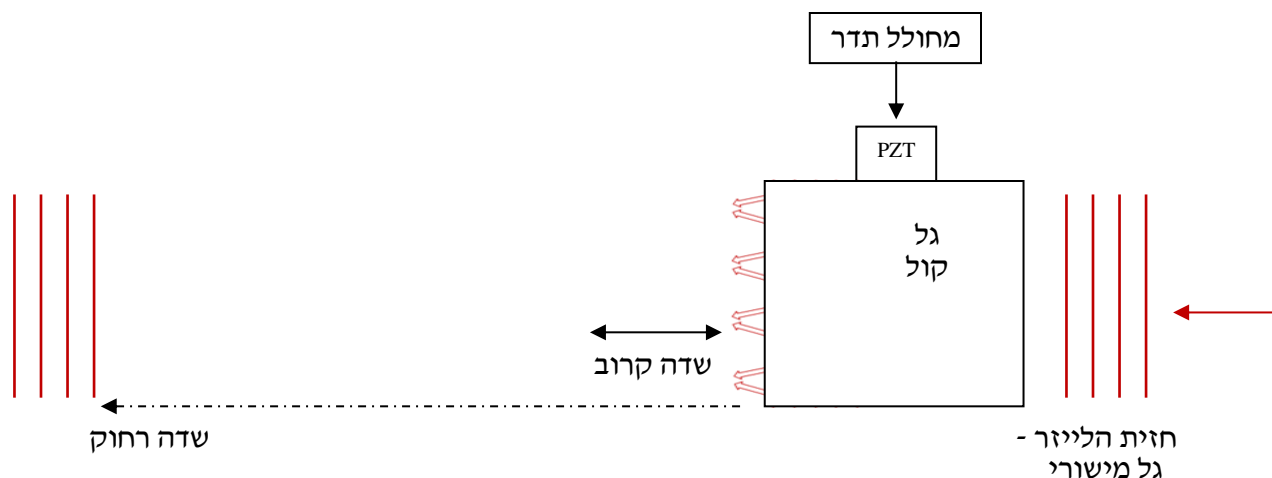
$$v = \tilde{\lambda} f \quad (3)$$

בניסוי שלפנינו נוצרים גלי הקול על ידי "זמזם" העשוי מגביש PZT המחובר לדופן של תא אקוסטו-אופטי. ה-PZT הוא מתנד (רמקול) העשוי מגביש פיאזו אלקטרי (piezoelectric). לגבישים אלה התכונה שבשדה חשמלי הם מתכווצים בכיוון מסוים ומתרחבים בכיוון אחר, לכן אם מפעילים על גביש כזה מתח חילופין הגביש מתכווץ ומתרחב באופן מחזורי. בתדירויות מספיק נמוכות נוכל לשמוע את רטט הגביש (אילו תדירויות?).

המתנד מחובר ישירות לתא אקוסטו-אופטי. זהו למעשה תא בעל שתי דפנות שקופות (ממוקמות אחת מול השנייה) בכדי לאפשר מעבר אור, בעוד שלדופן נוספת (בניצב לדפנות השקופות) מחובר ה-PZT היוצר רטט בתא. במהלך הניסוי נמלא את התא במלואו בנוזל (אתנול) ובהפעלת המתנד ניצור גל קול בנוזל.

נעביר קרן לייזר בעלת חזית מישורית דרך התא כך שכיוון התקדמות האלומה יהיה ניצב לכיוון התקדמות גל הקול בתא. גל הקול בתא יוצר שינוי בלחץ ובמקדם השבירה של הנוזל ולכן תהיה שבירה של קרני האור העוברים דרך התא. במקומות בהם ישנו שינוי מקסימלי במקדם השבירה יהיה מיקוד של קרני האור. התא ידמה סריג עקיפה במידה והשינויים הללו יהיו קבועים במקום. לשם כך יש לבחור תדר f שמקיים גל עומד בתא האקוסטי (מהו התנאי לכך?).

ראו איור 2 להסבר סכמתי ממבט על של התנהגות הגל המתקדם במערכת.



איור 2: סכמה ממבט על של חזית הגל המתקדמת במערכת.

הערה: שרטוט זה הוא עבור פאזת הגל (ולא העוצמה) למקרה של הרמוניות גבוהות.

בהתבוננות בחזית הגל לאחר התא האקוסטי, בשדה הקרוב, תיווצר תבנית מחזורית של הגל העומד בתא בנקודות בהן יש מיקוד של קרני האור (איור 2). המרחק בין נקודות אלו יהיה פרופורציוני למרחק בין נקודות הצומת של הגל העומד בהם ההפרעה מתאפסת לכל זמן t . המרחק בין הצמתים, Λ , הינו מחצית מאורך הגל של הגל העומד $\tilde{\lambda}$,

$$\Lambda = x_2 - x_1 = \frac{\tilde{\lambda}}{2} \quad (4)$$

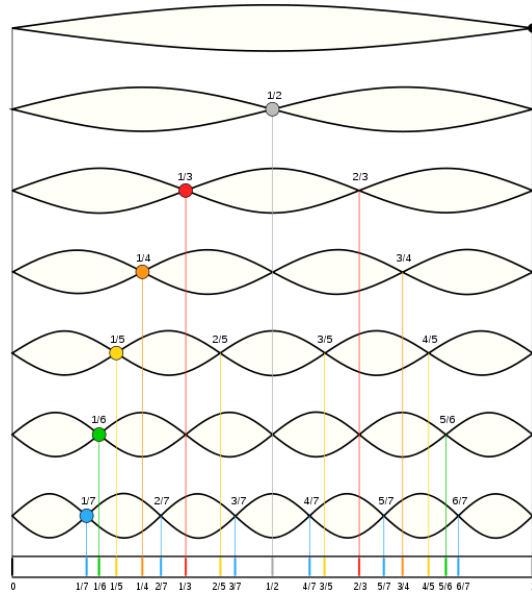
כאמור, תמונת השדה הקרוב היא בעלת תלות חזקה במרחק בו אנו מודדים, ולכן נעדיף למדוד את השדה הקרוב כמה שיותר קרוב לתא האקוסטי.

עבור תדרים גבוהים, כלומר מספר גבוה של צמתים בגל העומד, תתכן התלכדות של צמתים עם צמתים ממודים אחרים אם התדר הינו כפולה שלמה של תדר עצמי אחר של הגל העומד, תדרים אלו נקראים הרמוניות (ראו איור 3). לכן התמונה שתתקבל קרוב לתא האקוסטי בתדרים גבוהים אינה בעלת חזית סינוסואידלית אלא תמונה משוכללת (ראו איור 2).

מכיוון שהגל יוצר סריג צפיפות במים, הסריג גורם לנפיצת האור לסדרים $n = 0, \pm 1, \pm 2$ וכן הלאה. כדי למדוד את תמונת העקיפה הנוצרת נתבונן בקרניים ממרחק רב – בשדה הרחוק. התנאי להתאבכות בונה מסריג עקיפה, עבור זוויות קטנות, הינו:

$$d \sin \theta_n = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (5)$$

כאשר d הוא קבוע הסריג, λ הוא אורך הגל של המקור האופטי, ו- n מגדיר את סדר העקיפה (ראו הרחבה בחלק ד3. של תדריך ניסוי "גלי אור").



איור 3: הצמתים של הרמוניות מסדרים שונים

בכדי לקבוע מהו קבוע הסריג נזכר כי מהירות האלומה גדולה בהרבה ממהירות גל הקול בתא ולכן ניתן להתעלם מההשתנות הזמנית של גל הקול ומעצם היווצרות הגל העומד. אי לכך הגודל האופייני של סריג העקיפה הינו אורך הגל של גל הקול הנוצר בתא, $\tilde{\lambda}$, ולא המרחק בין הצמתים. מתוך מגבלות מערכת הניסוי נוכל למדוד לאחר התא האקוסטי רק את תמונת השדה הקרוב (מתוך חישוב מספר פרנל), לכן בכדי למדוד את תמונת העקיפה בשדה הרחוק נעזר בעדשה ℓ_3 בעלת מוקד f_3 שתיצור התמרת פורייה לגל היוצא מהתא האקוסטי. לשם כך נמקם עדשה ℓ_3 במרחק מה (גדול מ- f_3) מהדופן הקרובה ביותר של התא האקוסטי, ולאחריה נמקם גלאי (מצלמה) במרחק המוקד f_3 (ראו איור 4). אי לכך מתקיים עבור מרחק x_n ממרכז תמונת העקיפה לסדר n

$$\sin \theta_n = \frac{x_n}{f_3} \quad (6)$$

מנוסחאות 2-5 מתקבל קשר בין מהירות הקול בתווך לבין הגדלים במערכת, עבור מרחק ממוצע $\bar{\Delta x}$ בין סדרי העקיפה,

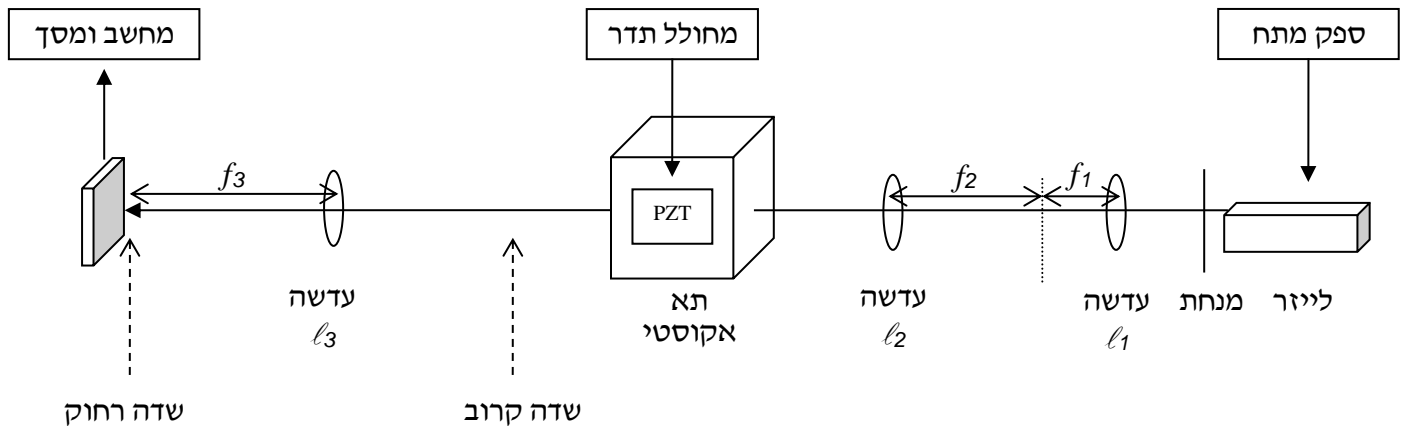
$$v = \tilde{\lambda} f = df = f \frac{f_3 \lambda}{\Delta x} \quad (7)$$

(שימו לב לסימונים: f הינו תדר המחולל ואילו f_3 הינו מרחק המוקד של עדשה ℓ_3 !)

את תמונת הדמות המתקבלת מהסריג נמדוד באמצעות מצלמת CCD. מצלמת CCD (Charge-Coupled Device) מורכבת מחיישן אלקטרואופטי הממיר את הספק האור הפוגע בו בכל רכיב תמונה למטען חשמלי. ה-CCD בניסוי מורכב ממטריצה של פיקסלים בגודל $1028_p \times 1028_p$, כאשר כל פיקסל בגודל $5.2_{\mu m} \times 5.2_{\mu m}$. מאחר וישנו חסם על כמות המטען שהמצלמה יכולה לדגום ישנו סף רוויה מעליו ה-CCD "מסנוור" ואינו מסוגל להפריד בין פוטונים. בכדי להתגבר על כך ניעזר במנחת המאפשר שליטה על עוצמת הקרן ונמקמו מיד לאחר יציאת האור מהלייזר. מתוך התמונה שנצלם בשדה הרחוק, התמרת הפורייה של הגל העומד בתא, נוכל למדוד את מיקום סדרי העקיפה והעוצמה בכל סדר של תבנית פראונהופר.

על ידי חיבור מערכת הניסוי, כפי שמתואר באיור 4, והרכבתה על פי העקרונות שפורטו לעיל נוכל למדוד את תמונת העקיפה המתקבלת בשדה הרחוק עקב אינטראקציית קרן האור עם הגל העומד בתא האקוסטי, האפקט האקוסטו-אופטי. כאמור, תמונה זו מתקבלת בשדה הרחוק והיא למעשה התמרת פורייה של תמונת התא האקוסטי המתקבלת בשדה הקרוב. על ידי התמרת פורייה הפוכה על התמונה שמתקבלת ב-CCD נוכל למצוא את תמונת השדה הקרוב.

במהלך הניסוי נוכל למדוד הן את תמונת השדה הקרוב והן את תמונת השדה הרחוק, ועל ידי התמרת פורייה והתמרת פורייה הפוכה להשוות בין המדידות שהתקבלו. כמו כן נחלץ את קבוע הסריג ונחשב את מהירות הקול בתווך, הן באמצעות נוסחאות (3),(4) לשדה הקרוב והן באמצעות משוואה (7) לשדה הרחוק.



איור 4: מבנה מערכת הניסוי, מבט צד

ד. שאלות הכנה

1. מהו היחס בין אורך המחזור בגל מתקדם לעומת הגל העומד?
2. איך משפיע הגל האקוסטי (גל הקול) על האור העובר דרכו?
3. כיצד נוכל למדוד את תמונת השדה הרחוק במערכת הניסוי מבלי להיעזר בעדשה ℓ_3 ?
4. כיצד משפיע השינוי בתדר הזמני f של המחולל על התדר המרחבי בשדה הקרוב (המרחק בין הצמתים)? העזרו במשוואה 3.
5. כיצד שינוי זה בתדר המרחבי של הגל העומד משפיע על המרחק בין סדרי העקיפה בשדה הרחוק?
6. מה הקשר המצופה בין המרחק של סדר העקיפה הראשון $n = 1$ מסדר העקיפה המרכזי $n = 0$, לבין התדר הזמני של המחולל f , בשדה הרחוק?
7. מה הקשר המצופה בין המרחק בין הצמתים לבין התדר הזמני של המחולל f , בשדה הקרוב?
8. מצאו דוגמה נוספת לתופעה בה ניתן להבחין בהתנהגות שונה בין השדה הקרוב לשדה הרחוק.
9. עבור רוחב תא אקוסטי של $62mm$ היעזרו בmatlab וחשבו כיצד תראה העוצמה במקרה שיש תדר בו יש התלכדות של הרמוניות שונות של הגל העומד. כלומר, עבור מספר גבוה של צמתים (~ 30) הציגו איכותית את העוצמה של הגל העומד הנוצר בתא כסכום של הרמוניות.

ה. מהלך הניסוי

במהלך העבודה נסתכל על פיזורים משטחיים של הלייזר, לכן נכוון את הלייזר לעוצמה מינימאלית שתאפשר לראותו מבלי להוות סכנה.

אין לגעת ברכיבים האופטיים (פילטר, עדשות, דפנות התא, עינית המצלמה וכו'..) בידיים!
אין להסתכל ישירות אל תוך קרן הלייזר!

ה.1 הכוונת המערכת

הכוונה אופטית

1. הדליקו את הלייזר וכוונו אותו כך שהתקדמות הקרן במרחקים שונים תהיה באותו גובה. היעזרו לשם כך בדף כיוול.
2. מקמו מנחת עוצמה קרוב ככל האפשר ללייזר (מבלי לגעת בו!).
3. במהלך העבודה אנו שואפים לעבוד עם קרן מקבילה לגמרי השומרת על מפתח קבוע, אולם הלייזר במעבדה בעל סטייה $\text{beam divergence} = 1.7 \mu\text{rad}$. כדי לתקן זאת נשתמש במערכת אופטית המורכבת משתי עדשות ℓ_1 ו ℓ_2 בעלות מרחקי מוקד $f_1 \approx 35\text{mm}$ ו $f_2 \approx 300\text{mm}$, בהתאמה. העדשות נבחרו כך שהמרחק ביניהן, $f_1 + f_2$ מפצה על ה beam div. (ראו איור 1).
4. מקמו את העדשות אחת אחרי השניה, כך שלאחר כל עדשה נוודא שהקרן מתקדמת בצורה מקבילה ופוגעת בדף הכיוול באותה נקודה בכל מרחק מהעדשה. לאחר מיקום שתי העדשות יש לוודא שמפתח הקרן ונקודת הפגיעה שלה בדף הכיוול זהה במרחקים שונים לאורך הציר האופטי!

הכוונת המצלמה

5. הוסיפו את מצלמת ה CCD בקצה הנגדי של המערכת.
6. התבוננו בתמונה שמתקבלת על המצלמה. לשם כך הפעילו את תוכנת "ThorCam", בחרו את המצלמה המחוברת למחשב ולחצו על כפתור הסרט (סרגל כלים עליון).
7. כוונו את המצלמה כך שניתן לראות על מרכז המסך את אלומת הלייזר.
8. היכנסו להגדרות המצלמה והקטינו את רווית המסך:
"image" → cancel "auto" → minimize "gain"
9. הוסיפו horizontal line ומקמו אותו כך שיעבור דרך מרכז התמונה
10. חזרו להגדרות ושנו את חשיפת התמונה: "camera" → reduce "exposure time"

הכוונת התא אקוסטי

11. וודאו כי התא מלא בנוזל.
במידה ולא - מלאו את התא האקוסטי בזהירות עד הדופן העליונה בכדי שלא ייווצרו בועות בתא. השתמשו בצינור לחץ האוויר בכדי "לסלק" טיפות נוזלים מדפנות התא, בצידו החיצוני בלבד. אין להכניס לחץ לתוך התא כדי לא לפגוע בחלונות!
12. הוסיפו את התא למערכת האופטית כך שדפנות התא השקופות ניצבות לציר האופטי.
13. חברו את התא למחולל: שחור=הארקה, אדום=מתח בגביש הפייזואלקטרי.
14. הפעילו את מחולל הגל, וודאו כי המחולל מוציא אות (כפתור output דלוק, ראו איור 3).

ה.2 מדידות

1. הזיזו את המצלמה קרוב ככל האפשר לתא מבלי שיהיה מגע ישיר לדופן התא.
2. בחרו את תדר המחולל סביב 2MHz ומצאו תדר מתאים בו ניתן לצפות בתבנית הגל העומד בשדה הקרוב בצורה ברורה. שימו לב ללחצנים המאפשרים לבחור את מידת הדיוק של שינוי התדר (איור 4).
3. וודאו כי הינכם מצליחים להבחין בין תבנית הרעש של הלייזר (סעיף 2) לבין תבנית העקיפה על ידי כיבוי והדלקת האות היוצא מהמחולל. העזרו בהגדרות המצלמה ובצמצם בכדי לשפר את הרזולוציה.
4. שמרו את התמונה שהתקבלה (סרגל כלים עליון - לחצן התקליטור הימני).
שם הקובץ יהיה $NF +$ התדר בו עבדתם!
5. השתמשו בפרופיל האופקי והתבוננו בתמונה שהתקבלה. מדוע לא התקבל פרופיל סינוסואידלי?
6. היעזרו בכלי הסרגל הצהוב שבצד השמאלי של המסך בכדי למדוד את המרחק הממוצע בין הקווים בתמונה. ניתן לשנות את צבע הסמן בכדי להקל על המדידה.
הערה: שימו לב כי הערכים המוצגים הינם פיקסלים של המצלמה ולכן חסרי יחידות. יחס ההמרה הינו $1px = 5.2\mu m$.
7. שנו את התדר בטווח 5MHz – 1בקפיצות של עשרות קילוהרץ וחזרו על סעיפים 4-6 עבור **כעשרה תדרים** בהם מתקיים גל עומד בתא האקוסטי בשדה קרוב ומדדו עבורם. (סה"כ כעשר מדידות!). היעזרו בחצים שעל המחולל כדי להגדיל את הרגישות ואת הדיוק בתדר.
8. ציירו גרף של המרחק הממוצע כתלות בתדר המחולל f .
9. מתוך שיפוע הגרף חלצו את מהירות הקול בנוזל באמצעות משוואה (3) והשוו לערך התיאורטי בספרות.

10. מקמו עדשה שלישית, ℓ_3 , עם מרחק מוקד $f_3 \approx 300mm$ במרחק כלשהו ($L > f_3$) מהתא.
11. מקמו את המצלמה במוקד עדשה ℓ_3 , כלומר במרחק $f_3 \approx 300mm$ ממנה.
12. בחרו בתדר בו מדדתם את התמונה בשדה הקרוב. תמונה זו מדמה את תבנית הגל העומד בשדה הרחוק בצורה ברורה.
13. וודאו כי הינכם מצליחים להבחין בין תבנית הרעש של הלייזר (סעיף 2) לבין תבנית העקיפה על ידי כיבוי והדלקת האות היוצא מהמחולל. העזרו בהגדרות המצלמה ובצמצם בכדי לשפר את הרזולוציה.
14. שמרו את התמונה שהתקבלה (סרגל כלים עליון - לחצן התקליטור הימני).
- שם הקובץ יהיה $FF + \text{התדר בו עבדתם}$!**
15. היעזרו בסרגל הכלים שבראש המסך והעבירו פרופיל אופקי בכדי לזהות ביתר קלות את מיקום הסדרים השונים.
16. היעזרו בכלי הסרגל הצהוב שבצד השמאלי של המסך בכדי למדוד את המרחק הממוצע מהמקסימה המרכזית $n = 0$ למקסימות מסדרים $n = \pm 1$. ניתן לשנות את צבע הסמן בכדי להקל על המדידה.
17. חזרו על סעיפים 12-16 עבור **כעשרה תדרים**. ראשית חזרו על המדידה בתדרים בהם מדדתם את תמונת השדה הקרוב. באם לא התקבלה תמונה ברורה עבור תדרי השדה הקרוב מצאו תדרים נוספים המקיימים גל עומד בשדה הרחוק ומדדו עבורם. (סה"כ כעשר מדידות!)
18. ציירו גרף של המרחק הממוצע כתלות בתדר המחולל f .
19. מתוך שיפוע הגרף חלצו את מהירות הקול בנוזל באמצעות משוואה (7) והשוו לערך התיאורטי בספרות.
20. השוו את תוצאותיכם בשדה הקרוב למדידות בשדה הרחוק. בחנו גם עבור כל תדר בנפרד. עליכם למצוא לפחות שני תדרים בהם מתקבלת תמונה של האפקט בשדה הקרוב וגם בשדה הרחוק. הציגו את ארבעת התמונות בדו"ח תוך הצגת הגדלים הרלוונטיים (תדר, קנה מידה, גדלים מדודים בתמונה וכן הלאה...).

ביונס:

השוו בין שתי התמונות שהתקבלו, בשדה רחוק ובשדה קרוב, עבור התדרים בהם עבדתם.

- ראשית גזרו את שתי התמונות כך שיהיו ריבועיות.
- בצעו לתמונת השדה הרחוק iFFT לקבלת תמונת הגל העומד.
- בצעו לתמונת השדה הקרוב FFT לקבלת תמונת העקיפה.
- האם יש התאמה בין התמונות השונות?

סיום עבודה

- כבו את הלייזר.
- כבו את המחולל ונתקו אותו מהתא.
- במידה והתא מלא במים יש לרוקנו! (אין צורך לרוקן תא המלא באתנול)
- הניחו את התא בזהירות בקצה המערכת האופטית, מאחורי המצלמה.
- שילחו את כל הקבצים ששמרתם לכתובת המייל האישית.



איור 5: מבנה מחולל התדר

1. תודות – Acknowledgments

תודה לפרופסור סטיב ליפסון ולפרופסור ארז ריבק על העזרה בפיתוח הניסוי כולו והתדריך בפרט.

2. ספרות עזר

- Born Max and Wolf Emil, Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of ,Cambridge [England] ; New York: Cambridge University Press, 1999. ISBN 0521642221
- Goodman, Joseph W, Introduction to Fourier optics, 2nd ed., Publisher: New York, NY: McGraw-Hill, 1996. Series: McGraw-Hill series in electrical and computer engineering ; Electromagnetics. ISBN: 0070242542

- Raman, C.V. and Nath, N. S., The Diffraction of Light by High Frequency Sound Waves, Proceedings of The Indian Academy of Science, part I, 1935, 2, 406; part II, 1935, 2, 413; part III, 1936, 3, 75.
- E N Ribak: [Harnessing caustics for wave front sensing](#). *Optics Letters* **26**, 1834-6 (2001).
- A Stup, E M Cimet, E N Ribak and V Albanis: [Acousto-Optic Wave Front Sensing and Reconstruction](#), *Applied Optics* **48**, A1-A4 (2008).