



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
Ben-Gurion University of the Negev

מעבדה באלקטרואופטיקה

361.1.4383

דו"ח מסכם - ניסוי באופטיקה גיאומטרית

מגישים: בר הראל 313611113

עדן בלדב 315360479

תאריך הגשה: 17.4.22

1. מטרת הניסוי

1.1. חוק סנל

- (א) חישוב מקדם שבירה של תווך ע"י מדידת הסחה מקבילית של קרן הפוגעת בלוח מקבילי.
- (ב) קבלת החזרה מלאה, הדגמת עקרון מוליך אור ומציאת המפתח הנומרי שלו.
- (ג) הדגמת עיקום הקרן בתווך בעל מקדם שבירה משתנה.

1.2. הדמיה בעזרת עדשות בודדות

- (א) קבלת דמויות ממשיות ומדומות בעזרת עדשה.
- (ב) בדיקת השפעת צמצם על איכות התמונה.

1.3. הדמיה בעזרת מערכת עדשות

- (א) הכרת פעולתו ומבנהו של מרחיב קרן.
- (ב) הדמיה בעזרת מערכת של שני עדשות.
- (ג) הכרת מכשירים אופטיים פשוטים.

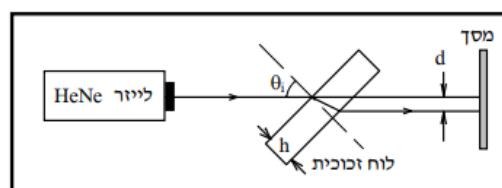
2. מהלך הניסוי

2.1. חוק סנל

- 2.1.1. נרצה לחשב את מקדם השבירה של לוח הזכוכית. לשם כך בנינו את המערכת המתוארת באיור 2.1.1.

6.2 - מדוד את הסטייה המקבילית של הקרן, עבור זוויות הטיה של לוח הפרספקס בתחום 0-60 מעלות.

- חשב את מקדם השבירה של הפרספקס לפי הנוסחה שקבלת בדו"ח מכין. עובי הלוח: mm75



איור 2.6: מתקן למדידת הטיה מקבילית של הקרן.

המשוואה בה השתמשנו בשביל לחשב את מקדם השבירה היא:

$$n_2 = \frac{n_1 * \sin(\theta_1)}{\sin(\arctan(\frac{\sin(\theta_1) - d/h}{\cos(\theta_1)}))}$$

כאשר n_2 זהו מקדם השבירה אותו אנו מחפשים, n_1 זהו התווך של האוויר, θ_1 זוהי זווית הפגיעה, h זהו עובי הלוח ו- d זהו ההיסט הנמדד של הקרן. נציב במחשבון ונקבל את הנתונים הבאים:

Δn_{total}	מקדם שבירה של הלוח	הסטייה של הקרן [mm]	זווית הטייה של הלוח
2.89	1.3578	3.5	10°
0.54	1.4077	8	20°
0.23	1.3919	12.5	30°
0.13	1.3466	17	40°
0.09	1.4178	26.5	50°
0.06	1.3009	31.5	60°

ממוצע מקדם השבירה שנמדד הוא 1.37, כאשר ידוע כי מקדם השבירה של זכוכית הוא 1.5. קיבלנו סטייה של 8.6%.

עבור חישוב שגיאת המדידות חישבנו ב-wolfarmalpha את הגדלים

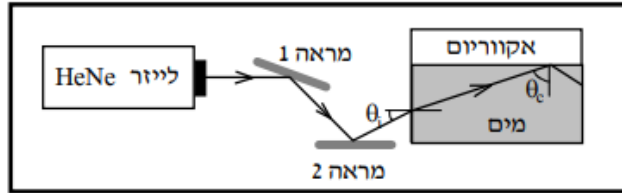
$$\Delta n_\theta = \frac{\partial n}{\partial \theta} * \Delta \theta, \Delta n_d = \frac{\partial n}{\partial d} * \Delta d, \Delta n_{total} = \sqrt{(\Delta n_d)^2 + (\Delta n_\theta)^2}$$

מפני שהמשוואה לחישוב מקדם השבירה תלויה גם בהיסט וגם בזווית הפגיעה, נצטרך לחשב עבור כל זווית את השגיאה שלה. דיוק המדידות בזווית הוא מעלה אחת, ודיוק ההיסט הוא מילימטר, לכן נקבל ששגיאות המדידות מתקבלות בעיקר ממדידות הזווית ושגיאות ההיסט כמעט אינן משפיעות.

2.1.2. כעת נרצה למצוא את המפתח הנומרי, כלומר את סינוס זווית הפגיעה המקסימלית, θ_i , עבורה

מתקיימת החזרה מלאה בתוך מים-אוויר.

- מדוד את הזווית הקריטית ואת זווית i המקסימלית



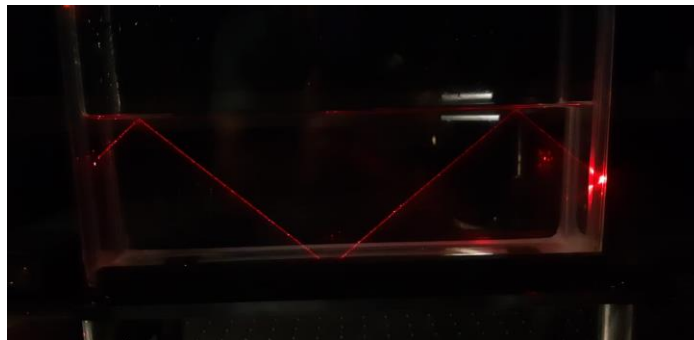
איור 2.7: המערך למציאת זווית קריטית במשטח אויר-מים והדגמת עקרון מוליך האור.

$$\theta_{i,max} = \arcsin(1.33 * \cos(\arcsin(\frac{1}{1.33}))) = 61.267 \text{ deg}$$

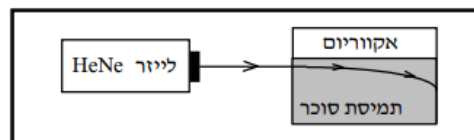
$$\theta_c = \arcsin(\frac{1}{1.33}) = 48.75$$

כדי למדוד זווית אלן, שינינו את כיוון מראה 1 מאויר 2.7 עד אשר קיבלנו את המצב הגבולי בו שינוי קטן של זווית המראה גורם להחזרה מלאה של הלייזר בתוך האקוריום. מדדנו מרחקים אלה באמצעות סרגל, ועבורם נקבל: $\theta_c = 40.45$, $\theta_{i,max} = 61.01$

2.1.3. הדגם את עקרון מוליך האור: הורד את מפלס המים, העבר אור בזווית הקרובה ל- i מקסימלית וקבל מספר החזרות של הקרן במים.



2.1.4. השתמש באקוריום בו תמיסת הסוכר. בנה את המערך המופיע באיור 8.2. שרטט את מסלול הקרן בעזרת נייר מילימטרי. מה הסיבה לעיקום הקרן? תן הערכה למקדם השבירה של הנוזל.



איור 2.8: (▲) הדגמת עיקום הקרן בתווך בעל שינוי רציף.

כאשר נוסף סוכר למים נעלה את ריכוז המומסים שבו. מקדם השבירה של הנוזל מתקשר באופן ישיר למהירות האור בתווך ע"י המשוואה $c = \frac{c_0}{n}$. אם נשתמש באינטואיציה הפיזיקלית של המודל החלקיקי של האור, נצפה שכעת עבור תמיסה עם ריכוז מומסים גבוהה, לפוטונים יהיה קשה יותר להתקדם בתווך מפני שכעת יש מולקולות סוכר שמפריעות להתקדמותו. כלומר לפי הניתוח האינטואיטיבי נצפה לכך שעליית ריכוז המומסים תגרום לעלייה במקדם השבירה.

כאשר נוסף את הסוכר למים ונערבב, נקבל נוזל אחיד בעל מקדם שבירה גדול יותר משל המים. אם נחכה זמן מסוים, מפני שהסוכר כבד יותר מהמים חלקיקי הסוכר ישקעו לקרקעית המיכל ונקבל כי מקדם השבירה יגדל ככל שנרד עמוק יותר באקוריום.

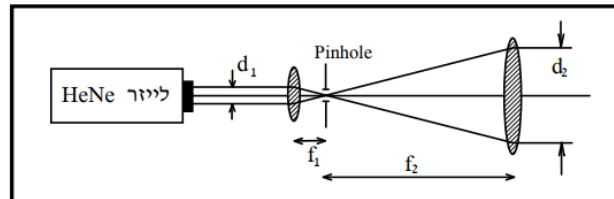
2.2. בניית מרחיב קרן

2.2.1. נרצה לבנות מרחיב קרן פי 10. לשם כך נשתמש בעדשות עם מרחק מוקד $f_1 = 50mm$ ו- $f_2 = 500mm$ ומדמיון משלושים נקבל את ההגדלה של רוחב הקרן פי 10. הצבנו את

לענות באופן תיאורתי: הערות עם [1]

העדשות לפי איור 2.4.

מיקמנו את ה-Pinhole במוקד המשותף של העדשות (במרכז המוקד של העדשה השמאלית). רוחב האלומה של לייזר HeNe הוא: $d_1 = 1mm$. נחשב את רוחב האלומה המתקבלת



איור 2.4 : מבנה מרחיב קרן.

במרחק המוקד:


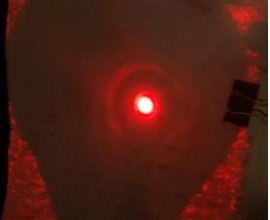
$$spot - size = \frac{2\lambda f}{D}, \text{ where } D = \min(len's \text{ length}, beam \text{ width})$$

$$\lambda = 632.8 \text{ nm}, D = d_1$$

$$spot - size = 0.06 \text{ mm}$$

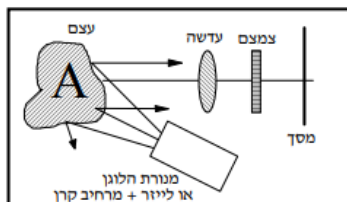
התוצאות שהתקבלו עבור חריצים בגדלים שונים מוצגות להלן:

תמונה	הגדלה + איכות הקרן	קוטר ה-Pinhole[mm]
-------	--------------------	--------------------

0.1	הכתם המרכזי מובהק יותר, מתקבלות טבעות אור ברורות מסביב לכתם.	
0.2	הכתם המרכזי מרוח במקצת, נראת טבעת אחת או שתיים באופן ברור.	
0.3	הכתם המרכזי נראה מרוח יותר, לא מתקבלות טבעות.	התמונה יצאה מטושטשת.

בכל המקרים קיבלנו הגדלה פי 10 פחות או יותר, אך עבור חרירים שונים קיבלנו תמונות שונות במקצת. ניתן לראות כי ככל שהחריר גדול יותר התמונה מוארת יותר והכתם טיפה מרוח יותר. ככל שהחריר קטן, הקו מתאר של הכתם המרכזי מובהק יותר ומתקבלות טבעות. הסיבה הפיזיקלית לכך טמונה בגודל ה-spot-size שחישבנו. ככל שהחריר קטן יותר כך נתקרב לגודל ה-spot-size ולכן נקבל הדמייה טובה יותר של מעבר גל מישורי בעדשה חיוכית - גל כדורי (פילוג עוצמה לפי Airy pattern) ולכן אנו מבחינים בטבעות העוצמה מסביב לנקודה המרכזית. עבור חרירים גדולים יותר, תדרים מרחביים נוספים עוברים בחריר המוסיפים רעש לדמות המתקבלת על המסך.

2.3.1. נרצה לבצע הדמייה באמצעות עדשה בודדת, לשם כך נבנה את המערך המופיע באיור 2.3.



איור 2.3: מערך לביצוע הדמייה.

2.3.2. תחילה, השתמשנו בעדשה עם $f = 50\text{mm}$. מיקמנו את העדשה במרחק 100mm מהמקור וקיבלנו דמות ממשית על המסך שמוקם במרחק 100mm מימין לעדשה, ובהתאם לתיאוריה המרחקים אכן מקיימים את משוואת ההדמייה של עדשה דקה:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{100} + \frac{1}{100} = \frac{1}{50} = \frac{1}{f} \Rightarrow f = 50 [\text{mm}]$$

2.3.3. לאחר מכן חזרנו על המדידות עבור המקרים: $s=f$, $f < s < 2f$, $s=2f$, $s > 2f$ (כאשר s זהו מיקום העצם). המדידות מתוארות בטבלה להלן:

הגדלה - חישוב אנליטי	הגדלה	כיוון הדמות	מיקום הדמות	S [mm]	f [mm]
גדול מאוד (אינסוף)	גדול מאוד	הפך	רחוק מאוד	$S = f$	50
2	2.136	הפך	150	$S = 1.5f$	50
1	1	הפך	100	$S = 2f$	50
0.5	0.545	הפך	75	$S = 3f$	50

נציין שבכל המדידות התקיים $s > f$ ולכן תמיד קיבלנו דמות ממשית והפוכה. חישוב ההגדלה האנליטי הוא לפי הנוסחה: $M = -\frac{v}{s}$. עבור $s=f$ לפי משוואת ההדמייה הדמות אמורה להתקבל באינסוף ואכן לא יכולנו להבחין בה בשלמותה עקב מגבלות הסטאפ. ככל שהגדלנו את מרחק העצם כך הדמות התקבלה במרחק קרוב יותר לעדשה ומידת ההגדלה הלכה וקטנה בהתאם.

התוצאות שקיבלנו מקיימות את משוואת ההדמייה של עדשה דקה, אולם קיים חוסר דיוק שבא לידי ביטוי בחישוב ההגדלה בפועל (חוסר דיוק של $\pm 1\text{mm}$ כתלות במכשיר מדידה שלנו).

סיבה נוספת לחוסר הדיוק היא שהיה קשה להבחין במיקום בו מתקבל הפוקוס הטוב ביותר של התמונה (נקבע סובייקטיבית על-ידנו).

2.3.4. השלב השני היה להציב צמצם בין העדשה למסך ולבחון את השפעת קוטר הצמצם על איכות התמונה המתקבלת (של הדמות הממשית של העצם).

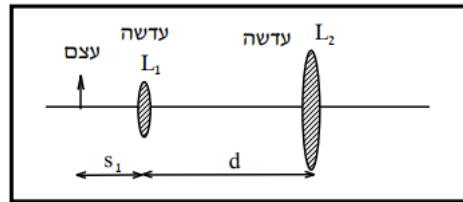
חריר עם קוטר קטן יותר	חריר עם קוטר גדול יותר
	

מהתמונות המצורפות ניתן לראות שעבור צמצם עם קוטר קטן יותר קיבלנו תמונה פחות מוארת אך חדה יותר, כלומר עם מידת ניגודיות גבוהה יותר - החריתות על העצם (מטבע של 10 אגורות) היו ברורות יותר. עבור צמצם עם קוטר גדול יותר קיבלנו תמונה מוארת יותר של כל העצם. התוצאות תואמות להסבר הפיזיקלי הקשור לעומק השדה כפי שהוסבר בדוח המכין.

2.3.5. השלב האחרון היה לתכנן ולבנות מערך אופטי עם עדשה בעלת $f = 50mm$ כך שתקבל דמות מדומה. דמות מדומה מתקבלת עבור כל S המקיים: $S < f$, לכן קבענו את המרחקים הבאים: $S = 0.5f$ ואנליטית הדמות אמורה להתקבל במרחק $-f = v$. מכיון שהדמות מדומה לא ניתן להבחין בה.

2.4. הדמיה בעזרת מערכת עדשות

2.4.1. כעת נרצה לבצע הדמיה בעזרת שתי עדשות לפי הפרמטרים בשאלת הכנה 4.7 ולבצע השוואה. העדשות בעלות מרחק מוקד $f_1 = 50mm$, $f_2 = 100mm$ ו- $S_1 = 100mm$. פרמטר d , כפי שמוצג באיור 2.5, משתנה ונתון בטבלה מטה:



איור 2.5: מערכת של שתי עדשות.

d [mm]	מיקום הדמות	מיקום הדמות אנליטית (ביחס ל- L_2)	סוג הדמות	סוג הדמות אנליטית	מידת הגדלה	מידת הגדלה אנליטית
250	300	300	ממשית ישרה	ממשית ישרה	2.045	2
150	אין אפשרות למדוד	100-	מדומה	מדומה הפוכה	הגדלה	2
50	אין אפשרות למדוד	33.33-	מדומה	מדומה הפוכה	הקטנה	2/3

לא היה ניתן לחשב את מיקום הדמויות המדומות ולכן יש לנו מדידה בפתול רק של השורה ראשונה שתואמת לתוצאות שהתקבלו בדוח המכין עד לכדי שגיאת מדידה שנובעת ממכשיר המדידה ($\pm 1mm$).

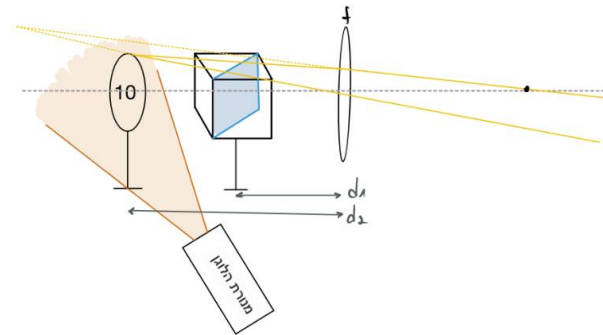
2.4.2. המשימה הבאה הייתה תכנון מכשיר אופטי לפי הוראות המדריך. המכשיר האופטי היה לבנות מערך אופטי בו ניתן לצפות בדמות מדומה. השלב האחרון היה לבנות מערך אופטי עם עדשה בעלת $f = 50mm$ כך שתקבל דמות מדומה ושנוכל לצפות בדמות המדומה ע"י אינטרפרומטר. התנאי לקבלת דמות מדומה עבור עדשה חיובית הוא שמיקום העצם u יקיים $u < f$. המערך שבנינו מוצג באיור הבא:

כאשר: $f = 500mm$; $d1 = 125mm$; $d2 = u = 200mm$. הסיבה למיקום

האינטרפרומטר היא שהקרניים מהעצם שמתפצלות באינטרפרומטר לכיוון הניצב ישחזרו את המשכי הקרניים המדומות (המשורטטות במקווקו באיור). ניתן היה לצפות בדמות המדומה דרך האינטרפרומטר בניצב למישור התקדמות הקרן הפוגעת. הדמות שהתקבלה הינה דמות מדומה ישרה ומוגדלת כפי שמתקבל לפי נוסחת הדימות של עדשה:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{200} + \frac{1}{v} = \frac{1}{500} \Rightarrow \frac{1}{v} = \frac{1}{500} - \frac{1}{200} = \frac{-3}{1000}$$

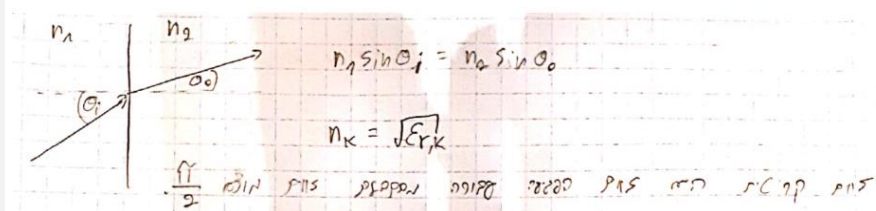
$$\Rightarrow v = -333.33 [mm]; M = -\frac{v}{u} = 1.66$$



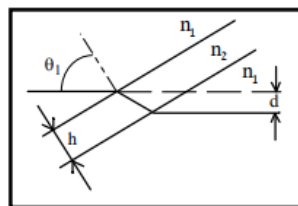
3. דו"ח מכין

4. שאלות הכנה

4.1. רשום והסבר חוק סנל. מהי זווית קריטית?



4.2. מצא נוסחה לחישוב מקדם השבירה n_2 של לוח בעל פאות מקבילות, כאשר ידוע זווית פגיעת הקרן θ_1 , עובי הלוח h וגודל ההטיה המקבילית d .



איור 2.1: הסחה מקבילית של קרן.

$$\cos \theta_2 = \frac{h}{d} \quad d = \frac{h}{\cos \theta_2} \quad \theta_3 = \theta_1 - \theta_2 \quad \sin \theta_3 = \frac{d}{h}$$

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad \sin \theta_3 = \sin(\theta_1 - \theta_2) = \sin \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_1 = \frac{d}{h}$$

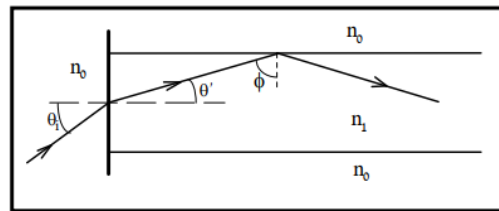
$$= \frac{d}{h} \cdot \cos \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_1 - \cos \theta_1 \cdot \tan \theta_2 = \frac{d}{h} \Rightarrow \tan \theta_2 = \frac{\sin \theta_1 - \frac{d}{h}}{\cos \theta_1}$$

$$n_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{\sin \left(\arctan \left(\frac{\sin \theta_1 - d/h}{\cos \theta_1} \right) \right)}$$

4.3. זווית הפגיעה המקסימאלית:

(א) מהו סינוס זווית הפגיעה המקסימאלית שעבורה תתקיים החזרה גמורה בתוך תווך בעל מקדם שבירה n_1 ?

(ב) חשב את זווית הפגיעה המקסימאלית עבור תווך אוריר ותווך מים.



איור 2.2: החזרה גמורה של קרן.

$$\sin \varphi_c = \frac{n_0}{n_1} \quad \text{עבור שני תווכים: } n_0 < n_1 \quad (4.9)$$

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos \varphi$$


$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \theta'$$

$$\sin \theta_{i, \max} = \frac{n_1}{n_0} \cdot \cos \varphi_c = \frac{n_1}{n_0} \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{n_0}{n_1} \right) \right)$$

$$n_0 = 1, \quad n_1 = 1.33 \quad \theta_{i, \max} = \arcsin \left(\frac{1}{1.33} \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{1}{1.33} \right) \right) \right) = \quad (8)$$

- 4.4. (א) רשום והסבר את נוסחת לוטשי העדשות.
 (ב) רשום והסבר את נוסחת ההדמיה של עדשה דקה.
 (ג) הגדר המושגים: עדשה שלילית, עדשה חיובית, דמות ממשית ודמות מדומה.
 (ד) עבור עדשה חיובית: מתי נקבל דמות ממשית ומתי דמות מדומה?

4.4 (א) עבור עדשה דקה, בלע מקדם שבירה n_1 סגור, n_2 פתוח, ופסגה קדמית R_1 ופסגה אחורית R_2 כפסגות, נוסחת מילר העשויה מקושרת לשל האות f היא מתוך המוקף של העדשה, המיקוד של שתי מוקפי העדשה:

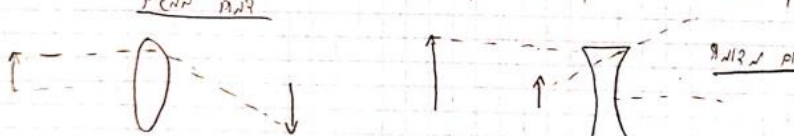
$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$


$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_o} + \frac{1}{z_i}$$

(ב) כאשר z_o שבו המוקד של העדשה, z_i שבו המוקד בו מתקבלת התמונה (הממשית או המדומה) של פסגה.

(ג) עדשה שלילית שזו עדשה פשוטה מתוך מוקף של $f < 0$. שטח זו נקרא גם עדשה מפזרת והדמיה המתקבלת על ידי ידע היא דמות מדומה. קדמי המוקד יתקבלו מאחורי המוקד פה. עדשים חיוביים: $f > 0$. הדמיה המתקבלת על ידי ידע היא דמות ממשית. קדמי המוקד יתקבלו במחנה המוקף של העדשה מאחורי המוקד פה. דמיון ממשית: דמיון המתקבלת במחנה מוקד ממשית, יכולה להיות על מוקף/על קווי קווי.

הערה: דמיון המתקבלת במחנה מוקד ממשית, יכולה להיות על קווי קווי.



4.5. מה אמורה להיות השפעת הצמצם על איכות התמונה המתקבלת בעת הדמיה בעזרת עדשה?

הצמצם מעביר קרניים בעלי זוויות קטנות ואילו מסנן קרניים בעלי זוויות גדולות ומשפיע בעיקר על 2 פמרטרים: כמות האור הפוגעת במסך ובעומק השדה (הקשור לחדות התמונה). ככל שהצמצם יהיה גדול יותר נקבל כי רוב הקרניים הפוגעות בעדשה מועברות גם ע"י הצמצם, שבא לידי ביטוי ברזולוציה גבוהה יותר. עבור תמונה חדה יותר נדרש שדה עמוק יותר המתקבל בצמצם קטן יותר. הסיבה לכך היא שממפתחים קטנים נוצרת תופעה אופטית המסונה דיפרקציה (עקיפה), כתוצאה מכך הגל מגיע גם לאזורים שבהם לפי כללי האופטיקה הגיאומטרית לא מגיעות קרניים הנעות בקווים ישרים.

4.6. באיור 2.4 מופיע מבנה של מרחיב קרן. הסבר את עיקרון הפעולה שלו. מה תפקיד ה-pinhole?

מרחיב קרן הוא מערכת אופטית המיועדת להגדלת קוטר קרן הלייזר. אופן הפעולה של מרחיב קרן הוא כך: קרני לייזר (מקבילות) פוגעות בעדשה חיובית הממקדת את הקרן במרחק המוקד שלה f . לאחר מכן ה-pinhole משמש כמסנן של תדרים גבוהים (כלומר מעביר תדרים נמוכים). העדשה החיובית השנייה נמצאת במרחק $2f$ מה-pinhole ומכיון שזהו מרחק המוקד שלה נקבל במוצא העדשה קרניים מקבילות. על מנת שקוטר הקרניים היוצאות יהיה גדול יותר מהקרניים בכניסה למערכת נדרש $f_2 > f_1$ (מדמיון משולשים). מטרת ה-pinhole היא לסנן רעשים הנובעים ממקורות לא אידיאליים.

4.7. באיור 2.5, נתונה מערכת הדמיה בעלת שתי עדשות. חשב את הגדלים הבאים בשלושה מקרים שונים:

(א) מקום הדמות המתקבלת

(ב) סוג הדמות (ממשית.מדומה) וכיוונה.

(ג) מידת הגדלה

$$s_1 = 100$$

$$f_1 = 50$$

$$f_2 = 100$$

$$d = 250$$

לפי נוסחת ההזמירה אלעזר דיקר נחשב:

$$L1: \left. \begin{aligned} \frac{1}{s_1} + \frac{1}{v_1} &= \frac{1}{f_1} \\ \frac{1}{v_1} &= \frac{1}{f_1} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{50} - \frac{1}{100} = \frac{1}{100} \end{aligned} \right\} v_1 = 100$$

$$L2: s_2 = d - v_1 = 150$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{s_2} + \frac{1}{v_2} &= \frac{1}{f_2} \\ \frac{1}{v_2} &= \frac{1}{f_2} - \frac{1}{s_2} = \frac{1}{100} - \frac{1}{150} = \frac{1}{300} \end{aligned} \right\} v_2 = 300$$

הזמירה מתקבלת במרחק יציא ממנו אלעזר L2

$$m_1 = \frac{v_1}{s_1} = -1 \quad \text{ההחזרה אחת העצמה המוקדית היא}$$

$$m_2 = -\frac{v_2}{s_2} = -\frac{300}{150} = -2 \quad \text{ההחזרה אחת העצמה השנייה היא}$$

$$\rightarrow m_{total} = m_1 \cdot m_2 = 2 \quad \text{כאשר קבלת צימוד מושך שורה זו העצמי 2}$$

* למקרה ג: $d=50$

ביאור: א/סן (נשק):

$$L1: \frac{1}{V_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{S_1} : \frac{1}{50} - \frac{1}{100} = \frac{1}{100} \Rightarrow V_1 = 100$$

$$L2: S_2 = d - V_1 = 50$$

$$\frac{1}{S_2} + \frac{1}{V_2} = \frac{1}{f_2}$$

$$\frac{1}{V_2} = \frac{1}{100} - \frac{1}{50} = -\frac{1}{100}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{S_2} + \frac{1}{V_2} = \frac{1}{f_2} \\ \frac{1}{V_2} = \frac{1}{100} - \frac{1}{50} = -\frac{1}{100} \end{array} \right\} V_2 = -100$$

$$M_1 = -\frac{V_1}{S_1} = -1 ; M_2 = -\frac{V_2}{S_2} = 2 ; M_{total} = -2$$

הנטיית הקרן במרחק 100 ממקו המוקד L2, כל תהיה נטיית הקרן

הנטייה במרחק 0.2.

* למקרה 3: $d = 50$

במיקרו אנסון (רשמי):

$$L1: \frac{1}{V_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{S_1} \Rightarrow V_1 = 100$$

$$L2: S_2 = d - V_1 = -50$$

$$\frac{1}{S_2} + \frac{1}{V_2} = \frac{1}{f_2}$$

$$\frac{1}{V_2} = \frac{1}{100} + \frac{1}{50} = \frac{3}{100}$$

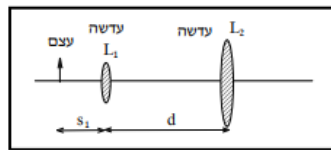
$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{S_2} + \frac{1}{V_2} = \frac{1}{f_2} \\ \frac{1}{V_2} = \frac{1}{100} + \frac{1}{50} = \frac{3}{100} \end{array} \right\} V_2 = \frac{100}{3} \sim 33.3$$

$$M_1 = -\frac{V_1}{S_1} = -1; \quad M_2 = -\frac{V_2}{S_2} = -\frac{2}{3}; \quad M_{tot} = -\frac{2}{3}$$

הנטיית הקרן במרחק 33.3 ממק האובייקט $L2$, זו תהיה צמיחה

הערכה הכוללת $M = -\frac{2}{3}$.

4.8. חשב את אותם פרמטרים כפי שמבוקש בשאלה 4.7. מה תפקיד המערכת?



איור 2.5: מערכת של שתי עדשות.

$s_1 = 13$
$d = 440$
$f_1 = 12.47$
$f_2 = 150$

$$L1: \frac{1}{v_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{s_1} \Rightarrow v_1 \approx 305.7$$

$$L2: s_2 = d - v_1 = 134.1$$

$$\frac{1}{v_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{s_2} \Rightarrow v_2 \approx -1268$$

$$M_1 = -\frac{v_1}{s_1} = -23.5; \quad M_2 = -\frac{v_2}{s_2} = 9.45 \Rightarrow M = -222.2$$

הנטיית תהיה רטונה במרחק 268 ממשאל לעצמה ב

ההצבה סי 222.2.

(ימן) איננה כי מרחק איננו זה ויש לה והצבה של עצמה תלך במרחק.