

-אופטיקה של גלים-

## אופטיקה של גלים

**מילות מפתח:**

גל אלקטרומגנטי, קיטוב, התאבכות, עקיפה, מונוכרומטיות, קוהרנטיות.

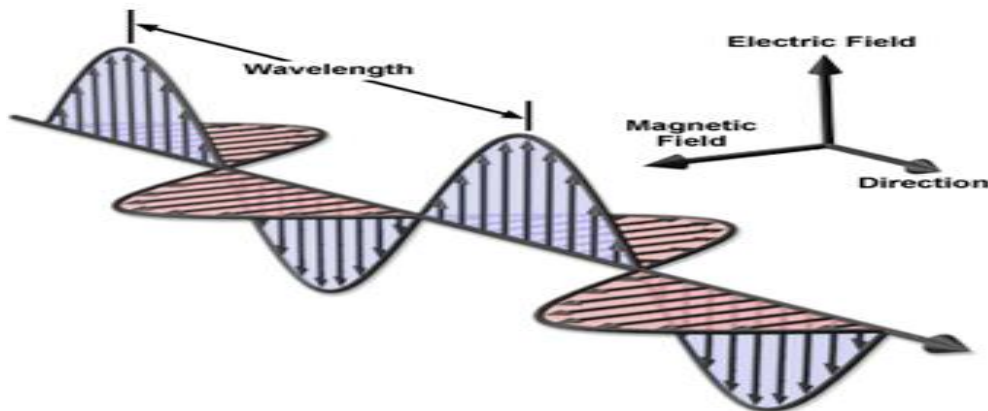
**הציוד הדרוש:** סרגל אופטי, מנורה + שנאי, גלאי אור, 2 מקטבים, 2 מולטימטרים. סרגל אופטי, לייזר פוינטר, מחזיק שקופיות, 2 סריגים, 2 חריצים, מסך עם נייר מילימטרי.

**מטרות הניסוי:**

- ללמוד על התכונות הגליות של האור.
- למדוד את חוק Malus לאור מקוטב.
- למדוד תמונת התאבכות משני סדקים.
- למדוד תמונת עקיפה מסדק יחיד.

### 1. תיאוריה

האור הינו גל אלקטרומגנטי המתפשט בריק במהירות קבועה  $c=3 \cdot 10^8$  m/s. גל אלקטרומגנטי מתאר תנודה בשדה החשמלי ובשדה המגנטי המתפשט במרחב.



ציור 1: גל אלקטרומגנטי

### 1.1 מושגים בנושא גלים

**גל רוחבי** - גל אשר ההפרעה היא בניצב לכוון התקדמות הגל, כגון: תנודות במיתר מתוח או גל אלקטרומגנטי בו וקטור השדה החשמלי ניצב לכוון התקדמות הגל.  
**גל מישורי** - גל מישורי הינו גל המתפשט במרחב ובו כל הנקודות שוות הפאזה נמצאות במישור אחד. גל מישורי מאופיין ע"י וקטור הגל  $k$  המאונך למישור ומצביע

## -אופטיקה של גלים-

בכוון התקדמות הגל, גודלו של וקטור הגל נמצא ביחס הפוך לאורך הגל. עבור גל אלקטרומגנטי מישורי יכתב השדה החשמלי כ-

$$(1) \quad \vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t)$$

כאשר  $E_0$  וקטור קבוע הניצב ל- $\mathbf{k}$ , וכן  $\omega = c|\mathbf{k}|$ .

**מונוכרומטיות** - (מונו=אחד, כרומו=צבע) כאשר ישנו אוסף גלים וכולם בעלי אותו אורך גל אלו נקראים גלים מונוכרומטיים, מקור המייצר גלים בעלי אורך גל יחיד נקרא מקור מונוכרומטי.

**קוהרנטיות** - שני גלים מונוכרומטיים אשר נמצאים בהפרש פאזה קבוע נקראים גלים קוהרנטיים. שני מקורות המייצרים גלים בהפרש פאזה קבוע נקראים מקורות קוהרנטיים.

**עוצמת האור** - עוצמת האור בנקודה מסוימת מתקבלת אם מסכמים את כל הגלים הפוגעים בנקודה, מעלים את הסכום בריבוע ומסתכלים על הממוצע בזמן.

### 1.2 קיטוב

בגל אלקטרומגנטי וקטורי השדה החשמלי והשדה המגנטי נמצאים במישור הניצב לכוון התקדמות הגל (למעשה שלשת הוקטורים  $\mathbf{k}, \mathbf{E}, \mathbf{B}$  מהווים שלשה ימנית). כלומר, גם אם נתבונן באוסף גלים מונוכרומטיים המתקדמים כולם באותו כוון, עדיין ייתכן שבכל אחד מהמרכיבים וקטור השדה החשמלי יצביע בכוון שונה במישור הגל וגם ייתכן שישנם הפרשי פאזה בין המרכיבים השונים.

אור שבו כל הגלים מתקדמים באותו כוון והשדה החשמלי מצביע בכוון יחיד במישור נקרא אור מקוטב לינארית, כוון הקיטוב הינו כוון השדה החשמלי. במקורות אור רגילים בטבע, כגון השמש או נורת להט, האור נפלט ע"י אטומים ומולקולות בלתי תלויים אשר פולטים אור בכל כווני הקיטוב, ובסיכומו של דבר מתקבל אור לא מקוטב.

ניתן לקטב אור במספר דרכים: קיטוב ע"י פיזור - אם מכוונים קרן אור בניצב לפני נוזל ובו חלקיקים קטנים מאד (תרחיף), האור מתפזר לכל הכיוונים. אם מתבוננים באור המתפזר בכוון ניצב לכוון הקרן הפוגעת, אור זה יהיה מקוטב

## -אופטיקה של גלים-

לינארית. הסיבה לכך היא שהשדה החשמלי של הקרן הפוגעת מנדנד את האלקטרונים בכוון השדה החשמלי ההתחלתי, האלקטרונים המתנדנדים משמשים כאנטנה המשדרת גלים מקוטבים בכוון נדנוד האלקטרונים.

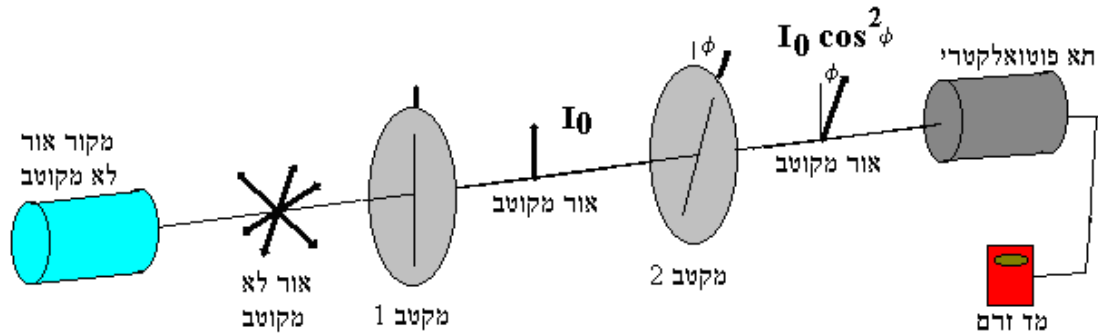
קיטוב ע"י החזרה - אור המוחזר ממשטח חלק בזווית ברוסטר הינו אור מקוטב, כוון הקיטוב מקביל למישור המחזיר את האור (ראה תדריך לניסוי אופטיקה גיאומטרית). לדוגמא האור במעבדה המוחזר מהרצפה הינו אור מקוטב וכן אור מכוניות המוחזר מכביש רטוב הינו מקוטב ברובו.

קיטוב ע"י בליעה - ישנם חומרים פלסטיים וגבישיים אשר בולעים את האור רק כאשר וקטור השדה החשמלי הינו בכוון מסוים. כלומר אור העובר דרך חומר כזה יוצא מקוטב מפני שכל רכיבי השדה החשמלי שהיו בכוון הבליעה נבלעו, והאור העובר מכיל רק רכיבים מקוטבים בניצב לכוון הבליעה. חומר כזה נקרא מקטב (Polarizer), ציר הקיטוב הינו הציר הניצב לכוון הבליעה. כאשר האור עובר דרך שני מקטבים בזה אחר זה, כל אחד מהמקטבים בולע את האור בכוון הבליעה שלו. אם צירי הקיטוב מקבילים זה לזה, למקטב השני לא נשאר לבלוע כלום ועוצמת הקרן העוברת תהיה מקסימלית. אם צירי הקיטוב ניצבים זה לזה, כל מה שיעבור את המקטב הראשון ייבלע ע"י המקטב השני, ועוצמת הקרן תהיה מינימלית. כאשר ישנה זווית פי בין שני צירי הקיטוב, אמפליטודת הגל העובר תהיה פרופורציונית ל  $\cos^2 \phi$ , ואילו עוצמת האור פרופורציונית ל  $\cos^2 \phi$ .

$$I = I_0 \cos^2(\phi) \quad (2)$$

קשר זה נקרא חוק Malus. בניסוי זה נייצר אור מקוטב ע"י מעבר של קרן אור דרך מקטב ונאמת את חוק Malus. מערכת הניסוי מורכבת ממקור אור לא-מקוטב, שני מקטבים ותא פוטואלקטרי, המערכת מתוארת בציר 1. בנוסחה 2  $I_0$  מייצג את עוצמת האור המקוטב (לאחר שהאור הלא מקוטב עבר דרך המקטב הראשון) ולפני שהוא נכנס למקטב השני הנטוי בזווית  $\phi$  יחסית למקטב הראשון.

## -אופטיקה של גלים-



ציור 1: מערכת למדידת חוק Malus לאור מקוטב.

במערכת הניסוי ניתן לסובב את המקטבים אחד ביחס לשני ולמדוד את הזווית בין צירי הקיטוב. התא הפוטואלקטרי מייצר זרם הפרופורציוני לעוצמת האור הפוגע, וכך ע"י מדידת הזרם והתאמתו ל  $\cos^2 \phi$  ניתן לאמת את חוק Malus.

### 1.3 התאבכות

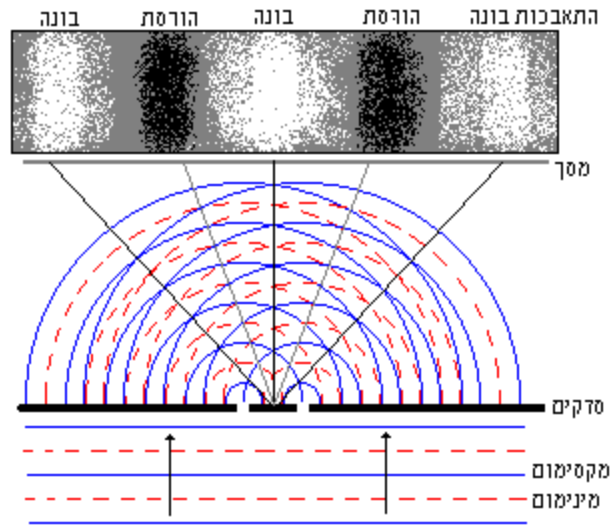
המושג התאבכות מתייחס למצב שבו עוצמה של גל הנוצר משני גלים שונה מסכום עוצמות המרכיבים. כלומר עוצמת הסכום שונה מסכום העוצמות. כיצד זה ייתכן? הדבר נובע מכך שעוצמת האור פרופורציונית לריבוע אמפליטודת הגל, ואילו כאשר שני גלים נפגשים יש לסכם את האמפליטודות ורק לאחר מכן להעלות בריבוע. התאבכות בונה מתרחשת כאשר עוצמת הסכום גדולה מסכום העוצמות ואילו התאבכות הורסת מתרחשת כאשר עוצמת הסכום קטנה מסכום העוצמות.

בדרך כלל במקורות אור רגילים אין אנו חשים בהתאבכות כלל מכיוון שבחלק מהזמן מתרחשת התאבכות בונה ובחלק מהזמן התאבכות הורסת כך שבממוצע עוצמת הסכום שווה לסכום העוצמות. כיצד ניתן לראות תמונת התאבכות? ובכן כאשר ישנם שני מקורות מונוכרומטיים וקוהרנטיים, הפרש הפאזה בין הגלים קבוע ולכן ההתאבכות מתרחשת לאורך זמן וניתן להבחין בה. אחת השיטות לייצר מקורות קוהרנטיים היא להעביר אור מונוכרומטי דרך שני סדקים סמוכים. במצב זה כל אחד מהסדקים מתפקד כמקור אור המקרין לכל הכיוונים, אבל, מכיוון ששניהם מוארים ע"י מקור אחד, הגלים היוצאים מהסדקים הינם קוהרנטיים. בכל נקודה במרחב אליה מגיעים גלים משני הסדקים ישנו הפרש פאזה קבוע בין שני

-אופטיקה של גלים-

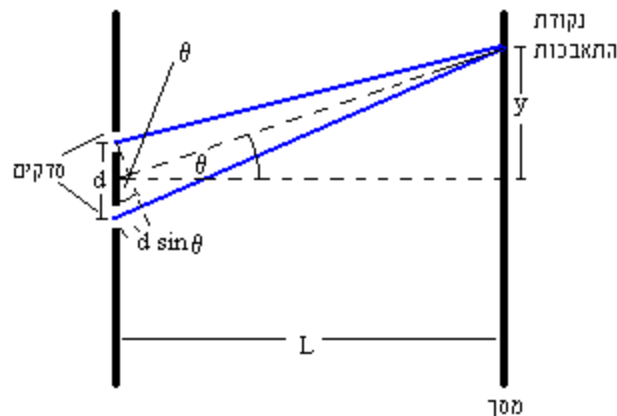
הגלים, אך הפרש זה שונה מנקודה לנקודה. נקודות שבהן הפרש הפאזה הוא אפס (או כפולה שלמה של  $2\pi$ ) שני הגלים מקבלים מקסימום ומינימום ביחד ולכן נוצרת התאבכות בונה, ואילו בנקודות שבהן הפרש הפאזה הוא  $\pi$  תיווצר התאבכות הורסת כלומר נקודה חשוכה.

בציור 2 מופיעה סכמה של אור מונוכרומטי העובר דרך שני סדקים סמוכים, קו רציף מציין את המקסימום ואילו קו מקווקו את המינימום. התאבכות בונה מתקבלת במקומות שבהם מקסימום פוגש מקסימום ומינימום פוגש מינימום. בנקודות בהן מקסימום פוגש מינימום מתקבלת התאבכות הורסת.



ציור 2: תבנית התאבכות משני סדקים.

על מנת לחשב במדויק את המקום בו תיווצר התאבכות בונה והורסת, נתבונן בהפרש הדרכים האופטיות בין הגלים היוצאים משני סדקים סמוכים כמתואר בציור 3.



## -אופטיקה של גלים-

**ציור 3:** שני גלים היוצאים מסדקים סמוכים ומגיעים לנקודה על גבי מסך רחוק

כאשר המסך רחוק יחסית למרחק בין הסדקים ( $L \gg d$ ) הפרש הדרכים שווה ל  $d \cdot \sin \theta$ . ולכן התאבכות בונה תתקבל כאשר הפרש הדרכים האופטיות שווה לכפולה שלמה של אורך הגל:

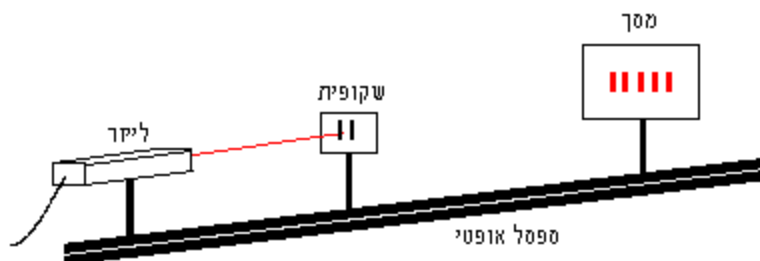
$$(3) \quad d \sin \theta = \frac{yd}{L} = n\lambda \quad n=0, \pm 1, \pm 2$$

ואילו התאבכות הורסת תתקבל כאשר הפרש הדרכים האופטיות הוא כפולה אי זוגית של מחצית אורך הגל.

$$(4) \quad d \sin \theta = \frac{yd}{L} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad n=0, \pm 1, \pm 2$$

נשים לב שתמונת ההתאבכות של פסים בהירים וכהים מתקבלת רק כאשר המרחק בין הסדקים ואורך הגל הם מאותו סדר גודל. אם המרחק בין הסדקים קטן מאד ביחס לאורך הגל ( $d \ll \lambda$ ), למשוואות (3) (4) קיים פתרון אך ורק עבור  $n=0$  כלומר ישנו רק פס אור במרכז ללא פסי חושך. לעומת זאת, המרחק בין הסדקים גדול מאד ביחס לאורך הגל ( $d \gg \lambda$ ), קווי האור והחושך צפופים כל כך עד שלא ניתן להבחין ביניהם.

בניסוי נשתמש בלייזר כמקור אור, מנורת לייזר מאופיינת בכך שהאור היוצא ממנה הוא מונוכרומטי. נשתמש בסדק כפול ונמדוד את תמונת ההתאבכות, באמצעות תמונת ההתאבכות נוכל לחשב גם את אורך הגל. מערכת המדידה מתוארת בציור 4.



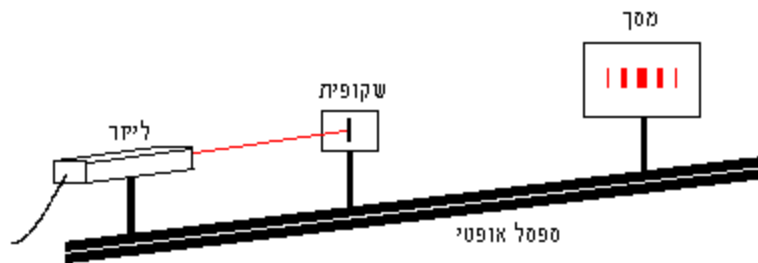
**ציור 4:** מערכת למדידת תמונת ההתאבכות מסדק כפול.

## -אופטיקה של גלים-

מערכת המכילה הרבה סדקים מקבילים במרווחים קבועים נקראת שריג. אם מקרינים אור מונוכרומטי על שריג, כל הסדקים בשריג משמשים כמקורות אור קוהרנטיים ותמונת ההתאבכות המתקבלת הינה חדה יותר, כלומר הפסים המוארים הינם צרים מאד ובהירים מאד. שימוש בשריג הינו יעיל יותר למדידה מדויקת של אורך הגל, או לחילופין אם אורך הגל ידוע למדידת המרווח בין הסדקים בשריג.

### 1.4 עקיפה

עקיפה מוגדרת כ"התעקמות האור סביב מעצור". כלומר, בניגוד לאופטיקה גיאומטרית, שם מתקדם האור בקרניים ישרות וכאשר מגיע למחסום נוצר צל מאחורי המחסום, כאשר לוקחים בחשבון את התכונות הגליות של האור ישנם איזורים מוארים גם מאחורי המחסום. לדוגמא, כאשר קרן לייזר עוברת דרך סדק יחיד שרוחבו  $a$ , תתקבל על המסך הנמצא במרחק גדול  $L$  תמונת עקיפה אשר בדומה לתמונת ההתאבכות מורכבת מפסים כהים ובהירים. המאפיין העיקרי של תמונת העקיפה מסדק יחיד הוא הימצאותו של פס רחב ובהיר מאד (עוצמת אור חזקה) במרכז המסך, ומסביבו פסים כהים ובהירים במרווחים קבועים אשר עוצמתם הולכת ופוחתת.



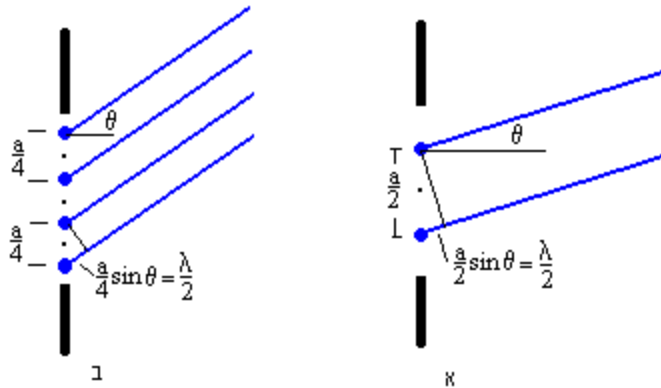
צור 5: עקיפה מסדק יחיד

ניתן להבין את תמונת העקיפה מסדק יחיד אם מתייחסים לכל נקודה בסדק כמקור אור עצמאי הקורן לכל הכיוונים, מקורות אלו הינם מונוכרומטים וקוהרנטיים. פסי החושך יתקבלו בנקודות שבהן לכל קרן יש בת-זוג בהפרש פאזה של  $\pi$  וכך כל הקרניים עוברות התאבכות הורסת. פס החושך הראשון יתקבל, אם כן, אם נתייחס לסדק כאל שני מקורות הנמצאים במרחק של  $\frac{a}{2}$  הפרש הדרכים

-אופטיקה של גלים-

האופטיות של הקרניים הוא  $\frac{a}{2} \sin \theta$  (ראה ציור 6) ולכן פס החושך יתקבל כאשר

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$



ציור 6: התאבכות הורסת בעקיפה מסדק יחיד. א- כאשר מתייחסים לסדק כשני מקורות. ב- כאשר מתייחסים לסדק כאל ארבעה מקורות.

באופן דומה פס החושך השני יתקבל אם נחלק את הסדק לארבעה מקורות שהמרחק

בין כל שניים סמוכים הוא  $\frac{a}{4}$ , אם כל שני מקורות סמוכים מבטלים זה את זה,

התנאי להתאבכות הורסת הוא  $\frac{a}{4} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$ . באופן כללי ניתן לחלק את הסדק

למספר זוגי של מקורות ולקבל את התנאי להתאבכות הורסת  $\frac{a}{2n} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$  אם

נתייחס למרחק בין הפסים על המסך  $y$  נוכל לרשום

$$(5) \quad a \sin \theta = \frac{ay}{L} = n\lambda \quad n = \pm 1, \pm 2$$

גם כאן ברור שניתן לראות את תופעת העקיפה רק אם אורך הגל הוא מאותו סדר גודל של רוחב הסדק.

בניסוי זה נשתמש במערכת המתוארת בציור 5 על מנת למדוד את תמונת העקיפה מסדק יחיד.

## 1.5 עבודת הכנה

1. עוצמת הגל פרופורציונית לריבוע האמפליטודה. הראה שכאשר מחברים שני גלים כל אחד בעוצמה  $I_0$  אשר יש ביניהם הפרש פאזה של מחזור שלם, העוצמה המתקבלת היא  $4I_0$ . וכאשר יש הפרש פאזה של חצי מחזור העוצמה המתקבלת היא 0.
2. מהי תמונת העקיפה שתתקבל מסדק יחיד כאשר  $\lambda \ll a$ ,  $\lambda \gg a$ . הסבר.
3. בניסוי של יאנג נתון סריג עם שני סדקים שהמרחק בניהם 0.1 מ"מ והמסך נמצא במרחק של 1.2 מ' מהסריג. אור בעל אורך גל יחיד (מונוכרומטי) של 500 ננו-מטר מוקרן על הסריג, מה יהיה המרחק של נק' ההתאבכות הראשונה והשנייה על המסך יחסית לנקודת המרכז?
4. אור מקוטב לאורך ציר Y ובעוצמה של  $I_0$  עובר דרך 2 מקטבים. הראשון נטוי ב- $15^\circ$  והשני ב- $30^\circ$  (שניהם יחסית לציר ה-Y). מה תהיה העוצמת האור לאחר המקטב הראשון ולאחר המקטב השני?

## 2. מהלך הניסוי

### 2.1 מדידת חוק Malus

- הרכב על גבי הספסל האופטי את המערכת המתוארת בציור 1. כוון את מקור האור, המקטבים והתא הפוטואלקטרי באותו גובה כך שקרן היוצאת מהמקור תעבור דרך המקטבים ותגיע לתא הפוטואלקטרי.
- סובב את המקטבים כך שעוצמת האור המגיעה לתא הפוטואלקטרי תהיה מינימלית, במצב זה הזווית בין המקטבים היא  $90^\circ$ . מדוד את הזרם.
- סובב את המקטבים בהפרשים של  $5^\circ$  מ  $90^\circ$  ועד  $270^\circ$  ומדוד את הזרם עבור כל זווית, הערך את השגיאה בזווית ובזרם.
- החסר מכל קריאת זרם את הקריאה המינימלית (זווית של  $90^\circ$  בין המקטבים), חלק את התוצאות בקריאת הזרם המקסימלית (זווית  $0^\circ$  בין המקטבים). בצורה זו קריאות הזרם מנורמלות בין 0 ל 1.
- שרטט גרף של עוצמת הזרם המנורמלת כפונקציה של  $\phi$ .

## -אופטיקה של גלים-

- שרטט גרף של עוצמת הזרם המנורמלת כפונקציה של  $\cos^2 \phi$  ובדוק את ההתאמה לחוק Malus. האם יש הבדלים? הסבר.

### 2.2 מדידת אורך הגל מתוך תמונת עקיפה מסדק יחיד

- הרכב את המערכת המתוארת בציור 4, כאשר המרחק בין הלייזר לשקופית 20cm והמרחק בין השקופית למסך 220cm. מדוד את המרחק בין השקופית למסך, הערך את השגיאה.
- נתונה לך שקופית ובה שלשה סדקים, רוחב הסדקים  $a=0.12, 0.24, 0.48 \text{ mm} \pm 5\%$ .
- הדלק את הלייזר, מקד את האלומה וכוון את אור הלייזר לעבר הסדק הצר, מתקבלת תמונת עקיפה. מדוד את המרחק בין פסי החושך משני צידי פס האור המרכזי, וכן את המרחקים בין פסי החושך מסדר שני ושלישי.
- חשב בעזרת משוואה (5) את אורך הגל של הלייזר, הערך את השגיאה.
- חזור על המדידה עבור שני הסדקים הנוספים באיזה מהסדקים המדידה נוחה ומדויקת יותר? תאר את תמונות העקיפה עבור כל אחד מהסדקים והסבר את ההבדלים.

### 2.3 מדידת אורך הגל מתוך תמונת התאבכות משני סדקים

- הרכב את המערכת המתוארת בציור 4, כאשר המרחק בין הלייזר לשקופית עם הסדקים 20cm והמרחק בין השקופית למסך 220cm. מדוד את המרחק בין השקופית למסך, הערך את השגיאה.
- נתונות לך שקופית ובה שלשה סדקים כפולים, כל צמד סדקים מאופיין במרחק בין הסדקים  $d$  וברוחב הסדקים  $a$ .  $A(d=0.6\text{mm}, a=0.12\text{mm})$ ,  $B(d=0.6\text{mm}, a=0.24\text{mm})$ ,  $C(d=1.2\text{mm}, a=0.24\text{mm})$
- כוון את אלומת הלייזר לעבר צמד הסדקים הדקים והצמודים ביותר (A), מתקבלת תמונת עקיפה ובתוכה קווי התאבכות עדינים (כמו מסרק). על מנת לזהות את קווי החושך מתמונת העקיפה מסדק יחיד ואלו הנובעים מההתאבכות

## -אופטיקה של גלים-

בין שני הסדקים, נסה להסתיר סדק אחד ואח"כ לחשוף אותו. תאר את התמונות השונות.

- מדוד את המרחק בין פסי ההתאבכות הדקים (על מנת לשפר את הדיוק, מדוד את המרחק בין שמונה פסים וחלק בשמונה).
- חשב בעזרת משוואה (3) את אורך הגל, הערך את השגיאה.
- חזור על המדידה עבור הצמדים הנוספים (C,B), תאר את תמונת ההתאבכות עבור כל אחד מהצמדים והסבר את ההבדלים. מהי ההשפעה של שינוי רוחב הסדקים על התמונה ומהי ההשפעה של שינוי המרחק בין הסדקים על התמונה.

### 2.4 מדידת אורך הגל ע"י סריג מדויק

- הצב סריג מדויק במקום השקופית (מספר החריצים 300/mm), קרב את המסך למרחק של כ 40cm מהסריג.
- מדוד את המרחק בין הסריג למסך, הערך את השגיאה.
- כוון את אלומת הלייזר, מתקבלת תמונת פסים חדה. זהה את הקו המרכזי ( $n=0$ ) ואת הקווים מסדרים גבוהים. סובב מעט את השריג סביב צירו, תאר כיצד סיבוב הסריג משפיע על התמונה, הסבר.
- מדוד את המרחק בין קווי אור מסדר ראשון לקו האמצעי והערך את השגיאה. (בצע את המדידה משני הצדדים וחשב את הממוצע). חשב את אורך הגל של הלייזר בעזרת משוואה (3), הערך את השגיאה.
- מדוד את המרחק בין קווי אור מסדר שני לקו האמצעי והערך את השגיאה. (בצע את המדידה משני הצדדים וחשב את הממוצע). חשב את אורך הגל של הלייזר בעזרת משוואה (3), הערך את השגיאה.
- השווה בין הערכים שקיבלת עבור אורך הגל של הלייזר בניסויים השונים, (עקיפה מסדק יחיד, התאבכות משני סדקים, שריג מדויק). איזו מדידה הינה מדויקת יותר? מדוע? הסבר את ההבדלים אם ישנם.

### 2.5 מדידת קבוע שריג

- הצב את השריג השני (שאינך יודע את המרווח בין הסדקים) במקום השריג הקודם.
- כוון את אלומת הלייזר, מתקבלת תמונת פסים. מדוד את המרחק בין קווי אור מסדר ראשון לקו האמצעי והערך את השגיאה. (בצע את המדידה משני הצדדים וחשב את הממוצע).
- מדוד את המרחק בין השריג למסך, הערך את השגיאה.
- השתמש באורך הגל שמצאת בסעיף הקודם, חשב את קבוע השריג בעזרת משוואה (3), הערך את השגיאה.

### 2.6 ניסויים נוספים – "כחוט השערה"

- מסתבר שכאשר ישנו מכשול דק בלתי עביר מתקבלת תמונת התאבכות זהה לתמונת ההתאבכות מסדק יחיד בעל אותו רוחב. חשוב והסבר מדוע. בעזרת עקרון זה ננסה למדוד עובי של שערה.
- כוון את אלומת הלייזר, הצב במקום השקופיות שערה מראשך כך שתמצא בתוך אלומת הלייזר. תאר את התמונה המתקבלת.
- שים לב שבניגוד למה שהיה מצופה על פי האופטיקה הגיאומטרית אין צל מרכזי מאחורי השערה כי אם תמונת התאבכות כמו מסדק יחיד.
- מדוד את המרחק בין קווי החושך וחשב באמצעות משוואה (5) את עובי השערה.
- נסה למדוד באופן זה את עוביין של שערות שונות (שיער חלק, מסולסל וכד') האם יש הבדל ?
- הצב מחט במקום השערה, שים את החלק העבה של המחט באלומת הלייזר, תאר את התמונה.
- הזז את המחט עד למצב שבו חוד המחט נמצא באלומת הלייזר, תאר את התמונה המתקבלת, הסבר.

-אופטיקה של גלים-

ניתן לראות באינטרנט סמולציה של התאבכות באתר:

<http://vsg.quasihome.com/interfer.htm>