

אפיון ההתנהגות של קרן לייזר במעבר דרך מקטבים, לוחות גל, ותווך דיאלקטרי

מדריך: * פז אור

* הדר שטראוס, * עדו מור

*האוניברסיטה העברית בירושלים

במעבדה זו חקרנו תופעות קיטוב עבור אור בספקטרום הנראה בעזרת מקטבים ליניאריים ולוחות גל. הראנו את נכונותו של חוק מאלוס לשנים ושלושה מקטבים, את נכונות המודל התאורטי המתאר את התנהגות לוחות רבע וחצי גל ואת נכונות המודל המתאר החזרה מתווך דיאלקטרי בזוויות שונות.

I. רקע תאורטי

טבעו של האור הוא נושא עשיר. אחת האסכולות היא שלאור טבע גלי כפי שמתקבל ממשוואות מקסוול, כאשר פתרון אפשרי למשוואות אלו

בוואקום הוא $\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{2} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} + c.c$ ו $\vec{B} = \frac{\vec{B}_0}{2} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} + c.c$, כאשר $|\vec{B}_0| = \frac{|\vec{E}_0|}{2}(1)$ ו $\vec{B}_0 \perp \vec{E}_0$, מה שמתאר גל מישורי מונוכרומטי המתקדם בכיוון \vec{k} (מכאן והילך נשמיט את "c.c" מכל הביטויים הרלוונטיים).

תחת הפירוש הזה נחקור את תופעות הקיטוב, ההעברה דרך חומר בייפרינג'י [1] והחזרה מתווך דיאלקטרי.

א. קיטוב

את הקיטוב של אור נהוג להגדיר בעזרת כוון השדה החשמלי וניתן לחלקו לשלוש קטגוריות. נגדיר באופן שרירותי מערכת צירים ונסמן את

הבסיס $\{\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}\}$ כך ש $\hat{z} \parallel \vec{k}$. אור שמקוטב באופן

$\vec{E} = |E_{0,x}| e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \hat{x} + |E_{0,y}| e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \hat{y}$ יקרא מקוטב לינארית בכיוון $\vec{\xi} = (|E_{0,x}|, |E_{0,y}|)$ אם $\phi_x = \phi_y$. לעומת זאת, קיטוב שבו $\Delta\phi =$

$|\phi_x - \phi_y| = \frac{\pi}{2}$ ו $|E_{0,x}| = |E_{0,y}|$ יקרא קיטוב מעגלי, כשעבור $\Delta\phi > 0$ נקרא לו קיטוב מעגלי ימני ועבור $\Delta\phi < 0$ נקרא לו קיטוב

מעגלי שמאלי ובכל מקרה אחר נקרא לקיטוב האור אליפטי.

אחת הדרכים ליצור קיטוב לינארי היא על ידי העברת אור דרך מקטב. עבור חומר מקטב נגדיר את ציר הקיטוב ככיוון בו האור מקוטב לאחר

המעבר דרך המקטב. במסגרת ההנחות שלנו את האפקט של מקטב על קרן אור ניתן לתאר בעזרת חוק מאלוס:

(2) $I_{out} = I_{in} \cos^2 \theta$, כאשר $I = E^2$ הוא עוצמת האור ו θ היא הזווית היחסית בין כוון הקיטוב לציר המקטב. אזי עבור שלושה

מקטבים כשהראשון והשני בזווית יחסית θ והראשון והשלישי מאונכים העוצמה תהיה

(3) $I_{out} = I_{in} \cos^2 \theta \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) = \frac{I_{in}}{8} (1 - \cos(4\theta))$

ב. העברה דרך חומר בייפרינג'י

נתחיל מלהגדיר את מקדם השבירה n כייחס המהירויות $n = \frac{c}{v}$ כאשר c היא מהירות האור בריק ו v היא מהירות האור בתווך. ניתן להכליל

$$\text{את משוואה (1) ל } (4) \quad |\vec{B}_0| = \frac{|\vec{E}_0|}{c} n$$

חומר בייפרינג'י הוא חומר לא איזוטרופי שבו אור בקיטובים שונים חווה מקדמי שבירה שונים. במידה ולחומר בייפרינג'י יש שני מקדמי שבירה כאלה הוא יקרא יוני-אקסיאלי ובמידה ויש לו שלושה הוא יקרא בי-אקסיאלי. נגדיר את הציר האופטי \hat{e} ככוון שבו אור מקוטב לינארית בכוון \hat{x} רואה את אותו אינדקס שבירה n_o לכל \hat{x} (זהו ציר סימטריה של הגביש) ובמידה והאור נע בניצב לציר הסימטריה אור המקוטב בכוון \hat{e} יראה מקדם שבירה $n_e \neq n_o$.

אור אשר מבצע מסלול באורך L בחומר בעל מקדם שבירה n_α , נכנס בקיטוב $\vec{E} = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \hat{a}$ יוצא בקיטוב \hat{x} , $\vec{E} = E_0 e^{i(kz - \omega t + \phi_\alpha)} \hat{a}$ כאשר $\phi_\alpha = \frac{\omega}{c} L n_\alpha$. נסתכל על דוגמא בה אור נכנס לחומר בייפרינג'י בעל מקדמי שבירה שונים בכיוונים \hat{x} , \hat{y} בקיטוב $\vec{E} = |E_{0,x}| e^{i(kz - \omega t)} \hat{x} + |E_{0,y}| e^{i(kz - \omega t)} \hat{y}$ האור יצא בקיטוב: $\vec{E} = |E_{0,x}| e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \hat{x} + |E_{0,y}| e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \hat{y}$

לוחית רבע גל –רכיב אופטי שלאחר המעבר בו מתקבל הפרש פאזה: $|\phi_x - \phi_y| = \frac{\pi}{2}$. אור מקוטב לינארית שבו $|E_{0,x}| = |E_{0,y}|$ יצא מהלוחית מקוטב מעגלית.

לוחית חצי גל- רכיב אופטי שלאחר המעבר בו מתקבל הפרש פאזה: $|\phi_x - \phi_y| = \pi$.

הקורא הקשוב ישים לב שניתן ליצור חומרים כאלו על ידי דרישה על L (אורך המסלול) בחומר הביפרינג'י.

ג. החזרה מתווך דיאלקטרי

כשאור עובר בין חומרים שונים הוא עובר שבירה והחזרה. עבור אור שנע במישור x, y בזווית θ_{in} בייחס לציר z זווית ההחזרה תהיה θ_{in} וזווית השבירה θ_{out} תיקבע לפי חוק סנל: $n_1 \sin(\theta_{in}) = n_2 \sin(\theta_{out})$ (5) כאשר n_1 ו n_2 הם מקדמי השבירה שמתאימים לתווך בו האור נכנס ובו האור יוצא, בהתאמה.

נסתכל על חומר דיאלקטרי כך שהשפה שלו יושבת במישור x, z . נחלק למקרים: (1) השדה החשמלי בכוון z . (2) השדה המגנטי בכוון z .

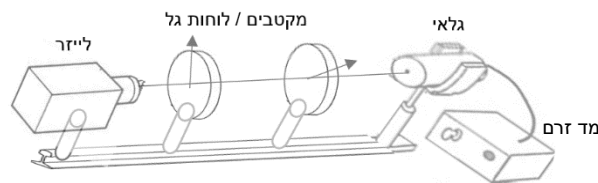
מתוך דרישות רציפות על הרכיב המקבילי למשטח של השדה החשמלי והמגנטי נקבל: (1) השדה החשמלי משני צידי מישור x, z צריכים להיות שווים $E_{in} e^{i\frac{\omega}{c} n_1 \sin \theta_{Rx}} + E_R e^{i\frac{\omega}{c} n_1 \sin \theta_{Rx}} = E_T e^{i\frac{\omega}{c} n_2 \sin \theta_{Tx}}$ לכל x . בצורה דומה ניתן לנסח את הדרישה למעבר עבור החלק המקביל למשטח של השדה המגנטי ובעזרת משוואות (4) ו **שגיאה! מקור**

ההפניה לא נמצא. נקבל את הקשר $\frac{E_R}{E_{in}} := R_s = \frac{n_1 \cos \theta_{in} - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{in}\right)^2}}{n_1 \cos \theta_{in} + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{in}\right)^2}}$ (6), מה שנותן את עוצמת האור המקוטב בכוון מאונך למישור z, x (מישור הפגיעה).

(2) באופן דומה ניתן לחזור על התהליך במקרה שבו השדה המגנטי מקביל לציר z ולקבל $\frac{E_R}{E_{in}} := R_p = \frac{-n_2 \cos \theta_{in} + n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{in}\right)^2}}{n_2 \cos \theta_{in} + n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{in}\right)^2}}$ (7). מה שנותן את עוצמת האור המקוטב בכוון המקביל למישור הפגיעה. נשים לב כי עבור $\theta_b = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$ נקבל ש R_p מתאפס. זווית זו נקראת זווית ברוסטר.

II. מערכת הניסוי

מערכת הניסוי מורכבת מספסל אופטי, שמצידו האחד ממוקם לייזר שאורך הגל שלו 632.8 [nm] ומצידו השני גלאי הממיר את עוצמת האור לזרם חשמלי ומחובר למד זרם. בין הלייזר לגלאי הוצבו רכיבים אופטיים שונים כגון מקטבים ולוחות גל, בהתאם לשלב המתאים בניסוי. תיאור סכמתי של המערכת ניתן לראות באיור 1.



איור 1: תיאור סכמתי של מערכת הניסוי. ניתן לראות את הספסל האופטי כשבצידו האחד יושב לייזר ובצדו השני גלאי, כאשר בניהם ממוקמים מקטבים ולוחות גל שונים.

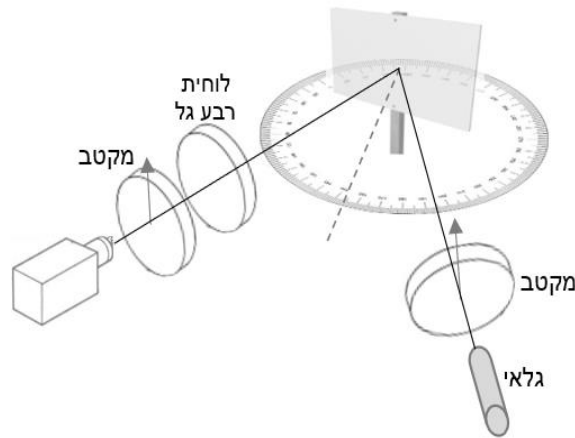
בכל אחד מחלקי הניסוי, הצבנו מיד לאחר הלייזר מקטב בכיוון בו קיבלנו עוצמה מקסימלית מהקרן העוברת דרכו. תפקידו של מקטב זה היה לדאוג לכך שקרן האור כולה תהיה מקוטבת ליניארית בכיוון הידוע לנו. בנוסף, בשלבי הניסוי השונים הוספנו למערכת רכיבים שונים: תחילה חקרנו את חוק מאלוס עבור שניים ושלושה מקטבים:

- (1) הצבנו מקטב נוסף לאחר המקטב הראשון, ושינינו את כיוון הציר האופטי שלו לזוויות שונות תוך מדידה העוצמה של הקרן העוברת.
- (2) קיבענו את המקטב השני להיות ניצב למקטב הראשון והוספנו מקטב שלישי בין אותם שני מקטבים. הפעם שינינו את הזווית של המקטב האמצעי.

לאחר מכן חקרנו את התנהגותם של לוחיות רבע וחצי גל:

- (1) הצבנו לוחית רבע גל כך שצירה היה בזווית 45° למקטב הראשון. לאחר הלוחית הצבנו מקטב נוסף שאת כיוונו שינינו תוך מדידת העוצמה המתקבלת.
- (2) הצבנו לוחית חצי גל בין המקטב הראשון ובין מקטב נוסף הניצב לו. שינינו את כיוון הציר האופטי של הלוחית לזוויות שונות ומדדנו את העוצמה המתקבלת.

לאחר מכן חקרנו החזרה מתווך דיאלקטרי. לשם כך הוספנו לוח פרספקס שישב על גוניומטר, כפי שמתואר באיור 2.



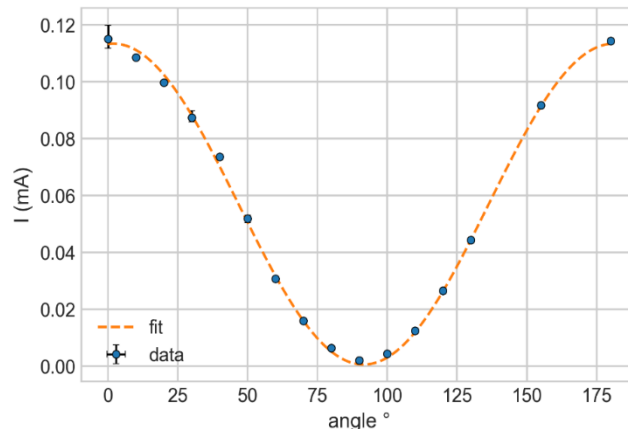
איור 2: תיאור סכמתי של מערכת הניסוי בשלב החקירה של החזרה מתווך דיאלקטרי.
ניתן לראות את קרן הלייזר העוברת דרך מקטב ולוחית רבע גל, ופוגעת בלוח הפרספקס
שיושב על הגוניומטר. הקרן מוחזרת ועוברת דרך מקטב ולבסוף בגלאי.

את הגלאי מיקמנו על ספסל אופטי נוסף שניתן לסובבו סביב ציר הגוניומטר. מערכת זו אפשרה לנו לסובב את לוח הפרספקס ולקבל זוויות פגיעה שונות של הקרן, ובהתאם לסובב את הגלאי לזוויות היציאה המתאימות וכך למדוד את העוצמה של הקרן המוחזרת מכל זווית. רצינו לחקור את העוצמה של רכיב הגל היוצא בניצב ובמקביל למישור הפגיעה. לשם כך, כפי שניתן לראות באיור 2, הצבנו לוחית רבע גל בזווית 45° למקטב הראשון וכך דאגנו לכך שרכיבי הגל הפוגע יהיו בעלי עוצמה זהה. בנוסף, לפני הגלאי הצבנו מקטב כך שבכל זווית פגיעה שונה מדדנו את העוצמה פעם כשכיוון המקטב במקביל למישור הפגיעה ופעם כשכיוונו ניצב.

III. תוצאות הניסוי

חלק I

כשלב ראשון, רצינו לבחון את העוצמה המתקבלת במעבר גל מקוטב ליניארית דרך מקטב ליניארי ולהשוות לחוק מאלוס כפי שמתואר משוואה (2). עשינו זאת על ידי הצבת מקטב במערכת הניסוי ושינוי כיוונו לזוויות שונות תוך מדידת העוצמה של הקרן העוברת את המקטב. את התוצאות ואת ההתאמה לחוק מאלוס ניתן לראות בגרף 1.

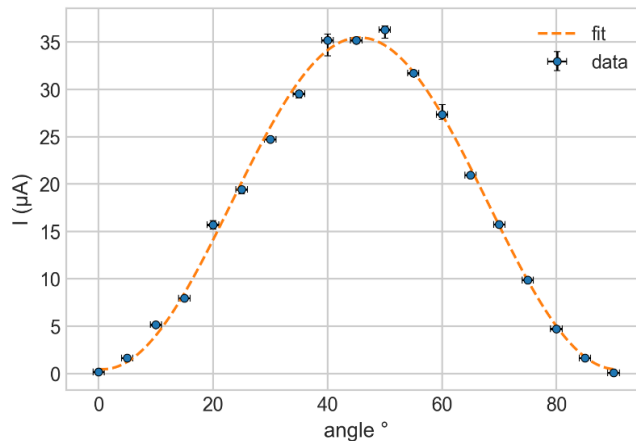


גרף 1: עוצמת קרן הלייזר (כפי שתורגמה לזרם) שעברה דרך שני מקטבים כתלות בזווית המקטב השני. קו ההתאמה הינו לפונקציה $a \cdot \cos^2(bx + c) + d$. הערכים שהתקבלו:

$$a = 0.112 \pm 0.001 [mA], \quad b = 1 \pm 0.01^\circ,$$

$$c = -0.03 \pm 0.02^\circ, \quad d = 5 \cdot 10^{-4} \pm 8 \cdot 10^{-4} [mA]$$

ניתן לראות בגרף 1 **שגיאה! מקור ההפניה לא נמצא.** כי התקבלה התאמה טובה של התוצאות למצופה מחוק מאלוס, פחות משליש מהנקודות אינם על גרף ההתאמה. קיבלנו כי $b = 1$ בטווח השגיאה, כמצופה. כשלב נוסף רצינו לבחון את העוצמה המתקבלת במעבר גל מקוטב ליניארית דרך שני מקטבים ליניאריים ולהשוות שוב לחוק מאלוס. עשינו זאת על ידי הצבת מקטב בזוויות שונות בין שני מקטבים ניצבים ומדידת העוצמה של הקרן העוברת את המקטבים. חוק מאלוס חוזה שהעוצמה שתתקבל תלך כפי שמתואר במשוואה (3). את התוצאות שהתקבלו וההתאמה לחוק מאלוס ניתן לראות בגרף 2.



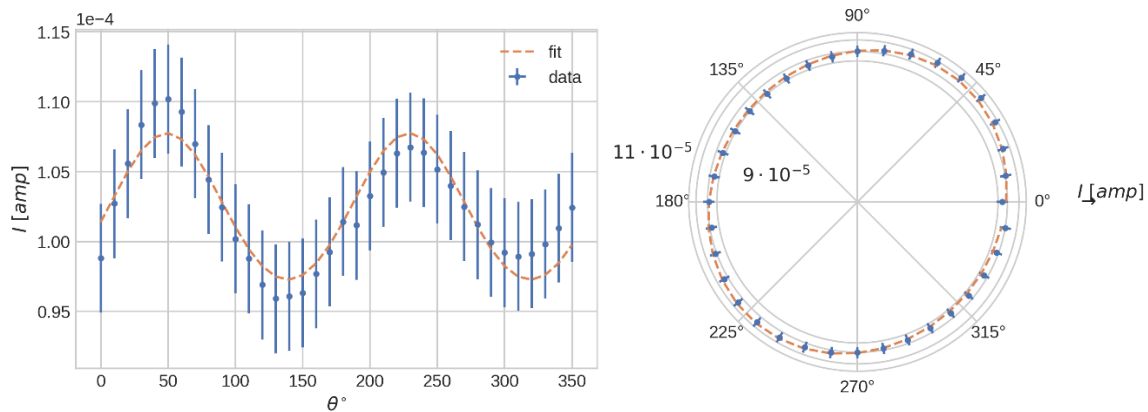
גרף 2: עוצמת קרן הלייזר (כפי שתורגמה לזרם) שעברה שלושה מקטבים כתלות בזווית המקטב האמצעי. קו ההתאמה הינו לפונקציה $a \cdot \cos^2(bx + c) \cdot \sin^2(bx + c) + d$. הערכים שהתקבלו:

$$a = 140 \pm 2 [\mu A], \quad b = 1 \pm 0.02^\circ, \quad c = 1.56 \pm 0.02^\circ, \quad d = 0.4 \pm 0.5 [\mu A]$$

ניתן לראות בגרף 2 כי התקבלה התאמה טובה של התוצאות למצופה מחוק מאלוס, פחות משליש מהנקודות אינם על גרף ההתאמה. קיבלנו כי $b = 1$ בטווח השגיאה, כמצופה.

חלק 2

בשלב השני רצינו לבחון את העוצמה המתקבלת במעבר גל מקוטב ליניארית דרך לוחית רבע גל ולהשוות לתאוריה. עשינו זאת על ידי הצבת מקטב לינארי, אחריו הצבנו חומר בייפרינג'י שמתנהג כלוחית רבע גל כשהציר האופטי שלו בזווית של 45° לציר הקיטוב. רצוי לציין שבמידה וציר האופטי של הלוחית אינו בדיוק ב 45° הקיטוב המתקבל יהיה אליפטי. לבסוף הצבנו מקטב נוסף שאת כוון ציר הקיטוב שלו שינינו לזוויות שונות תוך מדידת עוצמת הקרן. לפי התאוריה נצפה שאם אכן התקבל קיטוב מעגלי, העוצמה לא תהיה תלויה בזווית המקטב. את התוצאות שהתקבלו ניתן לראות בגרף 3.



גרף 3: הגרפים לעיל מתארים את עוצמת קרן הלייזר (כפי שתורגמה לזרם) שעברה מקטב, חומר בייפרינג'י שהציר האופטי שלו ב $45^\circ \pm 0.5^\circ$ לציר הקיטוב ומקטב נוסף הנמצא בזווית θ ביחס לציר הקיטוב של המקטב הראשון. הגרף הימני הוא גרף פולרי המציג את העוצמה כתלות בזווית בציר הרדיאלי, כשראשית הצירים מתאים לעוצמה 0. הגרף השמאלי הוא תקריב של הגרף הימני על טווח השגיאה המיוצג בקוארדינאטות קרטזיות.

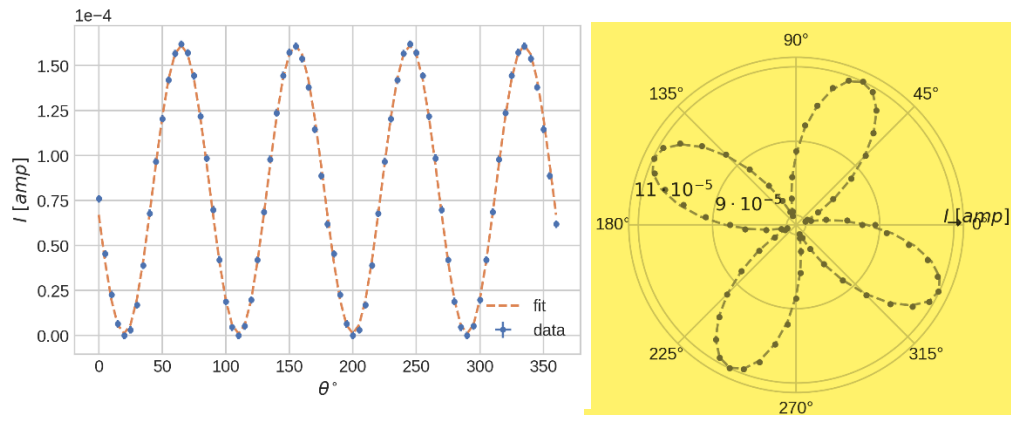
$$I = \frac{ab}{\sqrt{(a \sin \theta)^2 + (b \cos \theta)^2}} \quad \begin{array}{l} \text{קו} \\ \text{ההתאמה} \\ \text{הינו} \\ \text{לפונקציה} \end{array}$$

$$a = 1.08 \cdot 10^{-4} \pm 4.61 \cdot 10^{-7} [A], \quad b = 9.73 \cdot 10^{-5} \pm 4.17 \cdot 10^{-7} [A]$$

הגרף הימני מראה בברור שהקיטוב הוא אליפטי בעל ציר ראשי ב 45° ושהפרש אורכי צירי האליפסה (a, b) קטן מאוד, בעוד שהגרף השמאלי מראה את טיב ההתאמה לאליפסה ומאשר שהקיטוב אכן אינו מעגלי.

כפי שניתן לראות מגרף 3 אכן פספסנו את זווית 45° של הציר האופטי של הלוחית, כך שהתקבל קיטוב אליפטי.

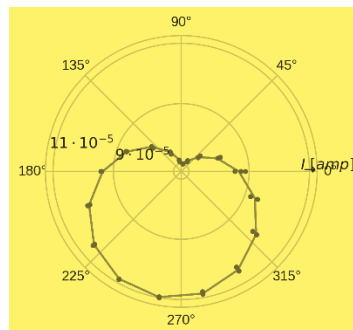
כשלב נוסף, רצינו לבחון את התנהגותה של לוחית חצי גל בזוויות שונות. על מנת לעשות זאת הצבנו לוחית חצי גל בין שני מקטבים שצירי הקיטוב שלהם ניצבים זה לזה ושינינו את זווית הציר האופטי של לוחית חצי הגל. נסמן את הזווית בין המקטב הראשון ללוחית חצי הגל ב θ . קיטוב האור הנכנס משוקף דרך הציר האופטי של לוחית חצי הגל ולבסוף האור מוטל על הכוון הניצב למקטב הראשון והעוצמה מוכפלת ב $\cos^2(90^\circ - \theta)$, מה שנותן לנו כי התחזית לעוצמה הסופית היא $I = (1 - \cos(4\theta))$ (8). הקורא הקשוב ישים לב שהביטוי שמתאר את עוצמת האור זהה למקרה של שלושה מקטבים לינאריים כפי שהוצג בגרף 2. את התוצאות ואת ההתאמה למשוואה (8) ניתן לראות בגרף 4.



גרף 4: הגרפים לעיל מתארים את עוצמת קרן הלייזר (כפי שתורגמה לזרם) שעברה מקטב, חומר בייפרינג'י שהציר האופטי שלו בזווית θ ביחס לציר הקוטב של המקטב הראשון ומקטב נוסף הנמצא בזווית $90^\circ \pm 0.5^\circ$ ביחס למקטב הראשון. קו ההתאמה הינו לפונקציה $I = a(1 - \cos(4\theta)) + b$
 $a = 8.01 \cdot 10^{-5} \pm 7 \cdot 10^{-7} [A], b = 1.07 \cdot 10^{-6} \pm 8 \cdot 10^{-7}$

כפי שניתן לראות מגרף 4 ההתאמה לתאוריה טובה מאוד.

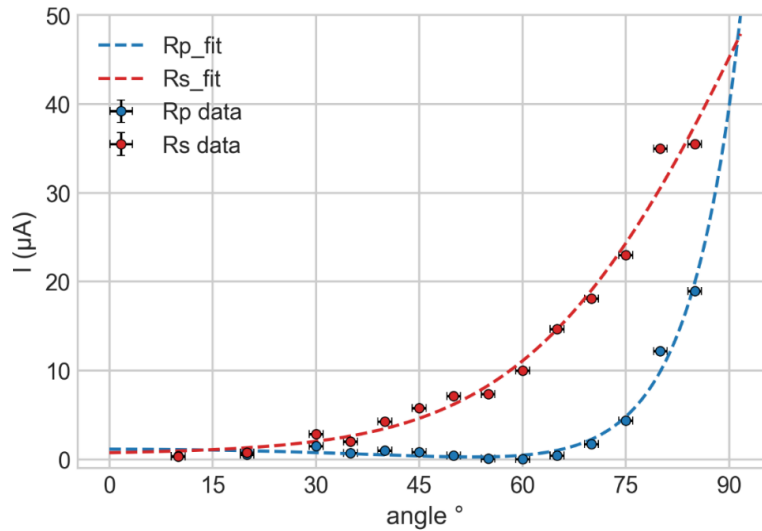
כפי שניתן לראות מגרף 4 ההתאמה לתאוריה טובה, ומהגרף הימני ניתן לראות שאכן הקיטוב לינארי: כוון הקיטוב הוא ככוון המקטב הראשון בכל נקודה בה I מתאפס (זו היא נקודה בה הציר האופטי של הלוחית מתלכד עם הציר הקיטוב או הציר הניצב לו) וככוון המקטב השני בכל נקודה בה I מקסימאלי, רצוי לציין שאת הביטוי התאורטי שקיבלנו היה ניתן לנחש ישירות ללא יחס לתאוריה, מהגרף הימני בגרף 4 שכן הוא ה[2] winding frequency שמתאים לכפולה הרביעית של התדר, אינדיקציה טובה לכך היא העובדה שעל ידי מתיחה של ציר θ ניתן לקבל את הגרף המתאר winding frequency של תדר יחיד כפי שנתן לראות בגרף 5



גרף 5: winding frequency של הגרף הימני של גרף 4

חלק 3

בשלב זה חקרנו את התנהגות קרן הלייזר במעבר דרך תווך דיאלקטרי. הצבנו לוח פרספקס מול הקרן בזווית שונות ומדדנו את העוצמה של הקרן המוחזרת, פעם את רכיבה הניצב ללוח ופעם את רכיבה המקביל אליו. את התוצאות שהתקבלו ואת ההתאמה לפי חוקי פרנל שתוארו במשוואות (6) ו (7) ניתן לראות בגרף 5.



גרף 5: עוצמת קרן הלייזר (כפי שתורגמה לזרם) שהוחזרה במעבר דרך תווך דיאלקטרי, לאחר מעבר במקטב ולוחית רבע גל, כתלות בזווית הכניסה לתווך. הנקודות הכחולות (R_p) נמדדו כאשר לפני הגלאי הוצב מקטב בכיוון המקביל לתווך, והנקודות האדומות (R_s) נמדדו כאשר לפני הגלאי הוצב מקטב בכיוון הניצב לתווך. קו ההתאמה הכחול (R_p) הינו לפונקציה:

$$a \cdot \frac{\sin(x+c-\sin^{-1}(\frac{\sin(x+c)}{n}))}{\sin(x+c+\sin^{-1}(\frac{\sin(x+c)}{n}))} + d$$

a [μA]	c°	d [μA]	n	
30 ± 80	0.03 ± 0.34	0.3 ± 0.4	1.4 ± 0.9	R_p
3 ± 8	0.8 ± 0.4	0 ± 2	1.4 ± 0.5	R_s

ניתן לראות בגרף 5 כי התקבלה התאמה טובה לחוקי פרנל. הגרפים מתחילים מאותו המקום ונחתכים באיזור 90° . R_s עולה מונוטונית בעוד ש R_p תחילה יורד לאפס ואז עולה. נקודת המינימום של ההתאמה ל R_p התקבלה ב: $\theta_b^{lab} = 52.72^\circ$ וזאת זווית ברוסטר. ערכי ה- n שהתקבלו בשני ההתאמות נופלים בטווח השגיאה האחד של השני ומתאימים לערך התאורטי של אינדקס השבירה של פרספקס $n_{ext} =$

$$\theta_b^{ext} = \tan^{-1}(n_{ext}) = 56.1^\circ \text{ היא } n_{ext} \text{ זו ל } [3] \frac{n_{perspex}}{n_{air}} = 1.4887$$

IV. סיכום ומסקנות

בניסוי זה חקרנו כיצד מתנהגת קרן לייזר במעבר דרך מקטבים ולוחיות גל ובחנו את ההתאמה לתאוריות לפי חוק מאלוס והעברה דרך חומר בייפרינג'. בנוסף בחנו כיצד הקרן מתנהגת כאשר היא חוזרת מתווך דיאלקטרי ובחנו את ההתאמה להחזרה לפי חוק פרנל.

ההתאמות לגרף העוצמה כתלות בזוויות המקטבים ולוחיות הגל התלכדו היטב עם התאוריה. בהחזרה מתווך דיאלקטרי קיבלנו כי התנהגות העוצמות של הרחיב הניצב והמקביל מתלכדת עם המצופה מחוק פרנל. מתוך כך קיבלנו תחזית ניסיונית לאינדקס השבירה של לוחית החומר הדיאלקטרי אותה השונו עם מקורות חיצוניים בהצלחה.

[1] “שבירה כפולה - ויקיפדיה, [מקוון]. Available: https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A9%D7%91%D7%99%D7%A8%D7%94_%D7%9B%D7%A4%D7%95%D7%9C%D7%94

[2] “winding frequency video”, [מקוון]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=spUNpyF58BY>

[3] “reflective index of plastics”, [מקוון]. Available: [https://refractiveindex.info/?shelf=3d](https://refractiveindex.info/?shelf=3d&page=pmma&book=plastics)