

אפקט פאראדיי – התופעה המגנו-אופטית שמשגעת את העולם

תכונות האור היוו מקור למחקרים וניסויים רבים לאורך ההיסטוריה של חקר הפיזיקה. במשך שנים רבות פיזיקאים רבים שעסקו בתחום החשמל הניחו כי לא קיים קשר בין מגנטיות לחשמל. לאחר שהוכח קשר זה, עמלו מדענים רבים להראות את ביטויי בגלי האור. גילוי אפקט פאראדיי היווה נקודת מפנה בהיסטוריה של הפיזיקה בכל הקשור לגלי אור ומחקרם. הניסוי של מייקל פאראדיי היווה בסיס לעבודתו של ג'יימס מאקסוול בתחום תורת האלקטרומגנטיות המהווה אחד מעמודי התווך של הפיזיקה המודרנית. בניסוי זה רצינו לשחזר את מסקנותיו של פאראדיי ולבדוק את השפעת השדה המגנטי על הקיטוב של האור.

מבוא

האור הינו קרינה אלקטרומגנטית אשר אורך הגל שלה נע בין 400 ל-750 ננומטר. קרינה זאת מתוארת על ידי 3 תכונות עיקריות והן עוצמה, אורך גל וקיטוב. בניסוי זה חקרנו את תופעת שינוי קיטוב האור - תופעה הגורמת לשינוי כיוון השדה החשמלי של הגל על ידי העברתו בטווחים שונים. השימושים המוכרים ביותר בקיטוב נעשים במשקפי התלת מימד בקולנוע ובצילום בעדשות ייחודיות. אפקט פאראדיי הינו אחד מהדרכים לשליטה בקיטוב. קיטוב מסוג זה נעשה על ידי שימוש בשדה מגנטי חיצוני ובגבישים אשר מסובבים את כיוונו. אפקט פאראדיי היה ההוכחה הניסיונית הראשונה לקיומו של השדה המגנטי באור ומשמש כיום לחקר אסטרופיזיקה. בניסוי חקרנו את חוק מאלוס בין שני מקטבים ולאחר מכן השתמשנו בו על מנת לחקור את אפקט פאראדיי.

רקע הניסוי

קיטוב האור

אור מתואר על ידי שדה חשמלי ושדה מגנטי המתקדמים במרחב באופן ניצב זה לזה. כיוונו של השדה החשמלי הוא המגדיר את כיוון קיטוב האור. זוהי המשוואה המתארת גל מישורי:

$$\vec{E} = E_x \sin(k \cdot z - \omega t) \hat{x} + E_y \sin(k \cdot z - \omega t) \hat{y} \quad (1)$$

ניתן להבחין בין סוגי קיטובים שונים:

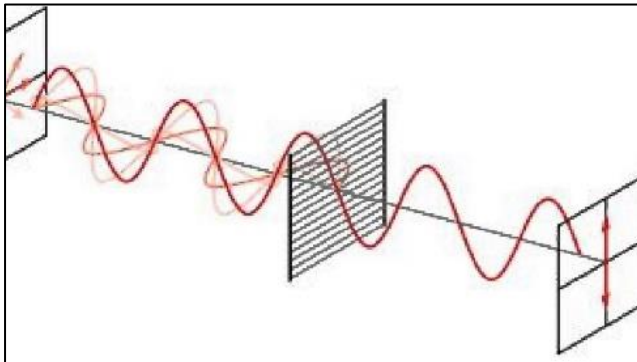
- קיטוב מעגלי בו כיוון השדה החשמלי מסתובב במהירות קבועה סביב ציר התקדמות הגל וגודלו של השדה נותר קבוע. קיטוב זה מחולק לשתי צורות קיטוב ימני ושמאלי אשר מתארים את כיוון המהירות הזוויתית. קיטוב ימני הוא קיטוב של גל שמהירותו הזוויתית היא עם כיוון השעון ובשמאלי המהירות הזוויתית היא נגד כיוון השעון. להלן משוואות המתארות את הקיטוב המעגלי:

$$E_{RHP}(\hat{z}, t) = \cos(kz - \omega t) \hat{x} + \sin(kz - \omega t) \hat{y} \quad (2)$$

$$E_{LHP}(\hat{z}, t) = \cos(kz - \omega t) \hat{x} - \sin(kz - \omega t) \hat{y} \quad (3)$$

- קיטוב אליפטי גם בו השדה החשמלי מסתובב סביב ציר התקדמות הגל אך גודלו משתנה עם הסיבוב ולמעשה ישנם כיוונים מועדפים במרחב בהם השדה החשמלי יהיה גדול יותר.
- קיטוב לינארי בו השדה החשמלי וכפועל יוצא מזה השדה המגנטי מתקדמים במישור אחד. זהו הקיטוב בו בחרנו להתעמק במעבדה זאת. קיטוב זה נהוג לייצג גם כסופרפוזיציה של קיטוב מעגלי ימני ושמאלי אשר שווים זה לזה ולכן מעקרון הסופרפוזיציה מבטלים זה את זה בכל מישור במרחב מלבד המישור של הקיטוב הלינארי. להלן המשוואה המתארת את הקיטוב הלינארי כסופרפוזיציה של קיטוב מעגלי ימני וקיטוב מעגלי שמאלי:

$$E_{LP}(\hat{z}, t) = \frac{1}{2} E_{RHP}(\hat{z}, t) + \frac{1}{2} E_{LHP}(\hat{z}, t) = \cos(kz - \omega t) \hat{x} \quad (4)$$



איור 1: גל לא מקוטב עובר דרך מקטב לינארי.

קיימים רכיבים אופטיים המשפיעים על כיוון קיטוב האור. ההשפעה על הקיטוב נעשית על ידי השפעה על השדה החשמלי או המגנטי.

מקטב לינארי מסוג פולרואיד הינו מקטב אשר מונע העברה של שדה חשמלי בכיוון המקביל לכיוון שרשראות הפולימרים המרכיבות את החומר. הדבר נעשה היות וכל השדות בכיוון זה מניעים אלקטרונים על פני שרשראות הפולימרים הצטברות האלקטרונים בקצה השרשראות יוצרת שדה חשמלי שווה בגודלו והפוך בכיוונו לשדה החשמלי של האור ומעקרון הסופרפוזיציה לבסוף לא עוברים

שדות בכיוון זה. השדות שעוברים את המקטב יהיו סופרפוזיציה של היטלי השדות בכיוון הניצב לשרשראות הפולימרים. (כמתואר באיור 1)

$$E_2 = E_1 \cos(\theta) \quad (5)$$

חוק מאלוס

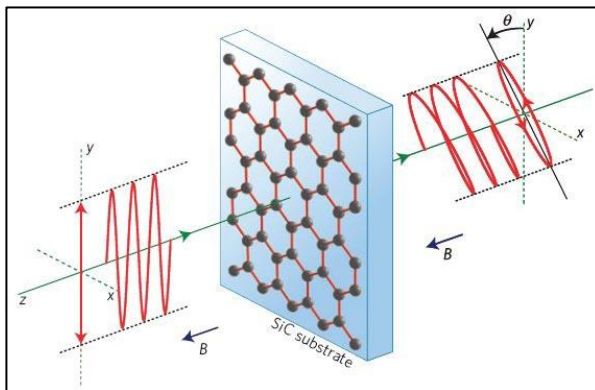
חוק מאלוס מתאר אור אשר מקוטב לינארית מלכתחילה ולאחר מכן מועבר דרך מקטב. במצב זה עוצמת האור תלויה בזווית שבין שני כיווני הקיטוב. הדבר נובע מכך שעוצמת האור שווה לריבוע השדה החשמלי.

זוהי המשוואה שתתאר את המצב הזה:

$$I = |E_2|^2 = |E_1|^2 \cos^2(\theta) = I_0 \cos^2(\theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

אפקט פאראדיי

אפקט פאראדיי מתאר תופעה במהלכה אור מקוטב לינארית מועבר דרך גביש אשר מצוי בתוך שדה מגנטי חיצוני. לאחר המעבר דרך השדה כיוון הקיטוב מסתובב. על מנת להסביר את התופעה יש להתייחס לגל מקוטב לינארית כאל סופרפוזיציה של שני גלים מקוטבים מעגליים אחד בעל קיטוב ימני והשני שמאלי.

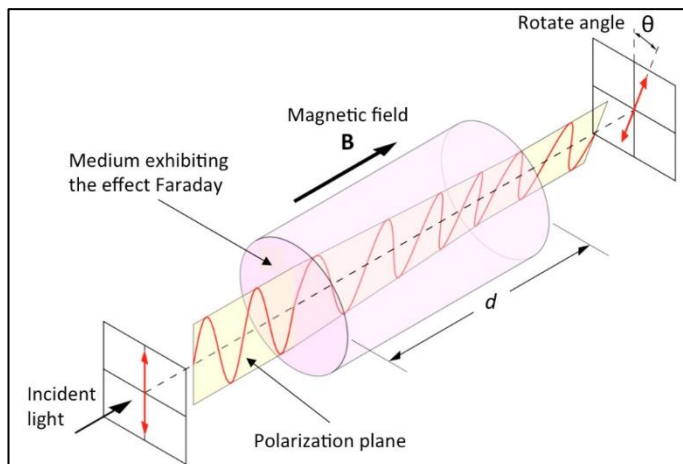


איור 2: התהליך הפיזיקלי המתרחש בגביש אשר יוצר את אפקט פאראדיי

בסופרפוזיציה שכזו נראה כי השדות החשמליים יצרו כוחות חשמליים על החלקיקים הטעונים שבגביש חלקיקים אלו יחלו לנוע התנועה מעגלית בהתאם לכיווני הכוחות החשמליים ותנועה זאת בתורה תיצור שדה מגנטי נוסף לשדה המגנטי החיצוני, אך כיווני השדות המגנטיים יהיו הפוכים עבור הקיטוב המעגלי הימני ועבור השמאלי, כפי שניתן לראות באיור 2. הסופרפוזיציה עכשיו עם השדה המגנטי החיצוני תיצור שדה מגנטי אחד מחוזק ואחד מוחלש. ההפרש בגדלי השדה המגנטי ייצור

עיכוב בהתקדמותו של קיטוב מעגלי אחד וזירוז של התקדמות הקיטוב השני, כתוצאה מכך ייווצר הפרש פאזה אשר יגרום לסיבוב כיוון הקיטוב. האפקט עצמו מתואר על ידי המשוואה:

$$\theta = v \cdot l \cdot B \quad (7)$$



איור 3: מעבר קרן מקוטבת לינארית דרך גביש המצוי בשדה מגנטי המקביל לכיוון התקדמות הקרן

כאשר:

v – הינו קבוע ורדה. קבוע חומר שמשפיע על גודל אפקט פאראדיי הנצפה בחומר ותלוי באורך הגל העובר דרכו, בטמפ' החדר ובסוג החומר.

l – הינו אורך הגביש.

B – הינו השדה המגנטי.

האפקט מתואר באיור 3.

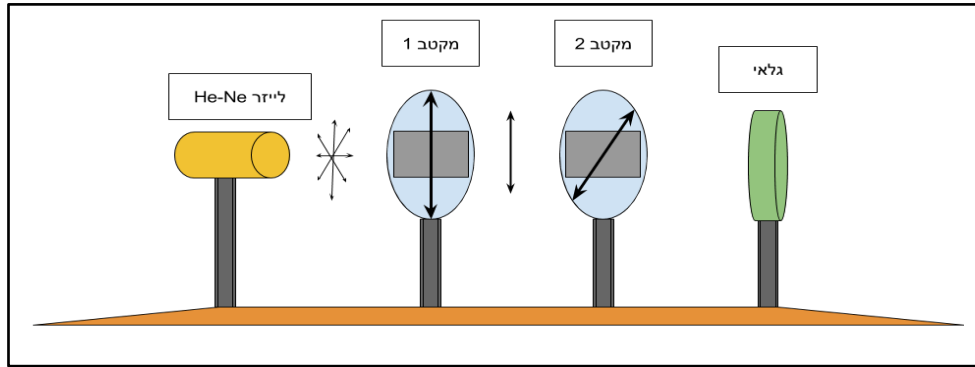
מהלך הניסוי

התנהגות של אור מקוטב לינארית

על מנת לבחון את התנהגות האור המקוטב לינארית ערכנו ניסוי עזר בו מדדנו את השתנות עוצמת הזרם החשמלי (המתאר את עוצמת קרן הלייזר) כפונקציה של הזווית בין 2 מקטבים לינאריים בהם הקרן עוברת.

מערכת ניסוי העזר

להלן איור המתאר את מערכת הניסוי:



איור 4: מערכת ניסוי העזר למדידת עוצמת קרן הלייזר כפונקציה של הזווית בין שני מקטבים לינאריים. המערכת מכילה (משמאל לימין) לייזר, שני מקטבים לינאריים וגלאי.

המערכת מכילה ספסל אופטי עליו מונחים הרכיבים השונים, ומקובעים אליו באמצעות ברגים. השתמשנו בלייזר הליום ניאון¹. הגלאי הפוטו-וולטאי הראה רגישות משתנה לסדרי גודל שונים של העוצמה הנמדדת. שמנו לב שהגלאי מציג תוצאות מדויקות יותר עבור קרינה בעוצמה בעלת סדר גודל נמוך ומציג תוצאות פחות מדויקות עבור קרינה בעוצמה בעלת סדר גודל גבוה. במילים אחרות, הגלאי מגלה רגישות משתנה בהתאם לעוצמת הקרן הנקלטת. את השגיאה הערכנו בהתאם לכל מדידה לפי הסיפורה המרצדת על מסך הגלאי. כמו כן, הבחנו בהתנהגות מחזורית של הגלאי, אשר באה לידי ביטוי בתוצאות השונות.

המקטבים הינם מקטבים לינאריים בעלי סקאלות של זווית, בעלי זווית קיטוב לא ידועה. אי לכך, בתחילת הניסוי בדקנו את זווית הקיטוב של כל אחד מהמקטבים ע"י חיפוש הזווית בה מתקבלת העוצמה המקסימאלית של האור בגלאי².

מדדנו תחילה את עוצמת הלייזר ללא מקטבים. לאחר מכן מדדנו את העוצמה המקסימאלית של הלייזר עם 2 המקטבים הלינאריים. קיבלנו פחות משמעותי בעוצמת הלייזר הנמדדת (כ-45% מהעוצמה המקורית). ייתכן שהפער המהותי נובע מכך שהמקטבים אינם אידיאליים – כלומר, מכילים שריטות וכיו"ב. בנוסף, בכל אחד מהמקטבים התרחשה תופעה של החזרה, כלומר, אחוז מסוים מהקרן הוחזר מהחומר ולא "המשיך" לעבר הגלאי. לאחר שמצאנו את זווית הקיטוב של כל אחד משני המקטבים ומדדנו את העוצמה המקסימאלית התחלנו בניסוי.

מהלך ניסוי העזר

הדלקנו את הלייזר כרבע שעה לפני תחילת המדידות, זאת על מנת לתת ללייזר להתחמם ולהתייצב. הנחנו את שני המקטבים באופן שתתקבל עוצמה מקסימאלית בגלאי ומדדנו את העוצמה. הנחנו את שני המקטבים באופן שתתקבל עוצמה מינימאלית בגלאי – באופן כזה שהפאזה בין המקטבים הינה 90° ומדדנו את העוצמה³.

1 אורך הגל של לייזר ההליום-ניאון: $\lambda_{\text{HeNe}} = 632.8 \text{ nm}$

2 הערכנו את השגיאה בקריאת הזווית ב $\Delta\theta = 0.5^\circ$

3 העוצמה המינימאלית: $I_{\min} = 0.49 \pm 0.01 \mu\text{A}$

לאחר מכן שינינו את זווית הקיטוב של המקטב השני (כלומר המקטב שממוקם לפי הגלאי) ב"קפיצות" של 10° לכל מדידה. רצינו לקבל שני מחזורים של הגל ולכן ערכנו 36 מדידות - כלומר, "כיסינו" טווח של 360° , ומאחר שההתאמה, לפי התיאוריה, הינה $I \propto \cos^2 \theta$ ידענו שנקבל 2 מחזורים מלאים.

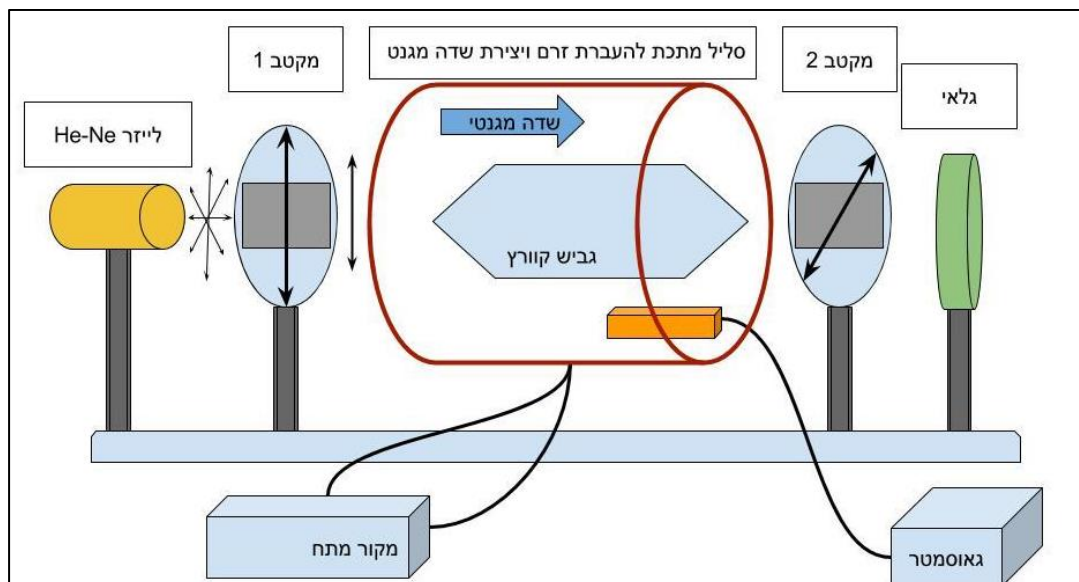
על תוצאות הניסוי נרחיב בהמשך, אך נקדים ונאמר שקיבלנו אישוש של התיאוריה, כלומר עוצמת הקרן אשר התקבלה בגלאי אכן הייתה פרופורציונאלית לריבוע הקוסינוס של השינוי בזווית הקיטוב, לפי חוק מאלוס המתואר במשוואה מספר 6. בהמשך הניסוי השתמשנו בתכונה זו של קיטוב האור.

ניסוי לבדיקת אפקט פאראדיי

לאחר מספר שבועות בהם חקרנו התנהגות של קיטוב אור, ניסינו לחשוב על כיוון אחר לניסוי. נזכרנו בכך שהאור הוא גל אלקטרו-מגנטי – כלומר, מורכב מגל חשמלי ומגל מגנטי המאונכים זה לזה. תהינו האם ניתן לשנות את קיטוב האור באמצעות השפעה חיצונית על הרכיב המגנטי באור. לאחר מחקר קצר ברחבי האינטרנט מצאנו את התופעה המעניינת הנקראת בספרות "אפקט פאראדיי" (כמתואר בהרחבה ברקע). החלטנו לערוך ניסוי המאשש את התופעה.

מערכת הניסוי

על מנת למדוד את אפקט פאראדיי השתמשנו בלייזר הליום-ניאון, בשני מקטבים לינאריים, בגלאי פוטו-וולטאי, בדומה למערכת בה השתמשנו בניסוי העזר בנושא חוק מאלוס. בנוסף, השתמשנו בגביש קוורץ, סליל מתכת המחובר למקור מתח על מנת ליצור שדה מגנטי, וגאוסמטר – למדידת השדה המגנטי. להלן איור סכמתי המתאר את מערכת הניסוי:



איור 5: מערכת למדידת אפקט פאראדיי

מערכת הניסוי מכילה (משמאל לימין) - לייזר, מקטב לינארי ראשון, גביש קוורץ הממוקם בתוך שדה מגנטי המקביל לכיוון קרן הלייזר, מקטב נוסף וגלאי פוטו-וולטאי. השדה המגנטי נוצר באמצעות העברת זרם דרך סליל מתכת הנמצא מסביב לגביש הקוורץ. כמו כן, השדה נמדד על ידי גאוסמטר – מד שדה מגנטי. את השדה המגנטי מדדנו ביחידות של גאוס⁴.

קבוע ורדה התיאורטי על פי היצרון הינו: $\theta = 96 \cdot V$. בניסויים שערכנו ניסינו למצוא את הקבוע הנ"ל באופן אמפירי ולאשר את הקשר הלינארי בין השדה המגנטי המופעל על הגביש לבין השינוי בזווית הקיטוב, על פי התיאוריה של אפקט פאראדיי, המתואר במשוואה מספר 7.

ניסיון ראשון למדידת אפקט פאראדיי – הניסיון שכשל

תחילה ניסינו למדוד את השינוי של הזווית כתלות בעוצמת השדה המגנטי שהפעלנו בתווך בו עברה קרן הלייזר. ערכנו את הניסוי באופן הבא: קרן הלייזר הועברה דרך מקטב ראשון על מנת ליצור קיטוב לינארי, לאחר מכן הקרן הועברה דרך תווך שקוף (גביש קוורץ) עליו הפעלנו שדה מגנטי מקביל לכיוון התקדמות הקרן ולאחר מכן הצבנו מקטב לינארי נוסף. הגדלנו את עוצמת השדה המגנטי וחיפשנו באמצעות המקטב

⁴ הערכנו את השגיאה לפי שגיאת המכשיר: $\Delta B = 0.1(\text{gauss})$

השני מהי זווית הקיטוב החדשה של הקרן – כלומר, עבור איזו זווית של המקטב נקבל את העוצמה המקסימאלית של הקרן. ציפינו, בהתאם לתיאוריה של אפקט פאראדיי, לראות קשר לינארי בין עוצמת השדה המגנטי שהפעלנו לבין השינוי בזווית הקיטוב.

לצערנו, לא הצלחנו לראות שינוי מהותי בזווית הקיטוב כתלות בשינוי בשדה המגנטי. אנו מעריכות כי הניסוי לא צלח משום שהסקאלה של מד הזווית לא מספיק רגישה על מנת לזהות שינוי בקנה מידה בו זווית הקיטוב השתנתה. נדגים זאת ונרחיב על כך בהמשך הדו"ח.

הבנו שנצטרך לחפש שיטה נוספת למדידת השינוי בזווית הקיטוב. נזכרנו בחוק מאלוס והחלטנו לנסות למדוד את השינוי בזווית הקיטוב לפי השינוי בעוצמת קרן הלייזר, לפי משוואה 6.

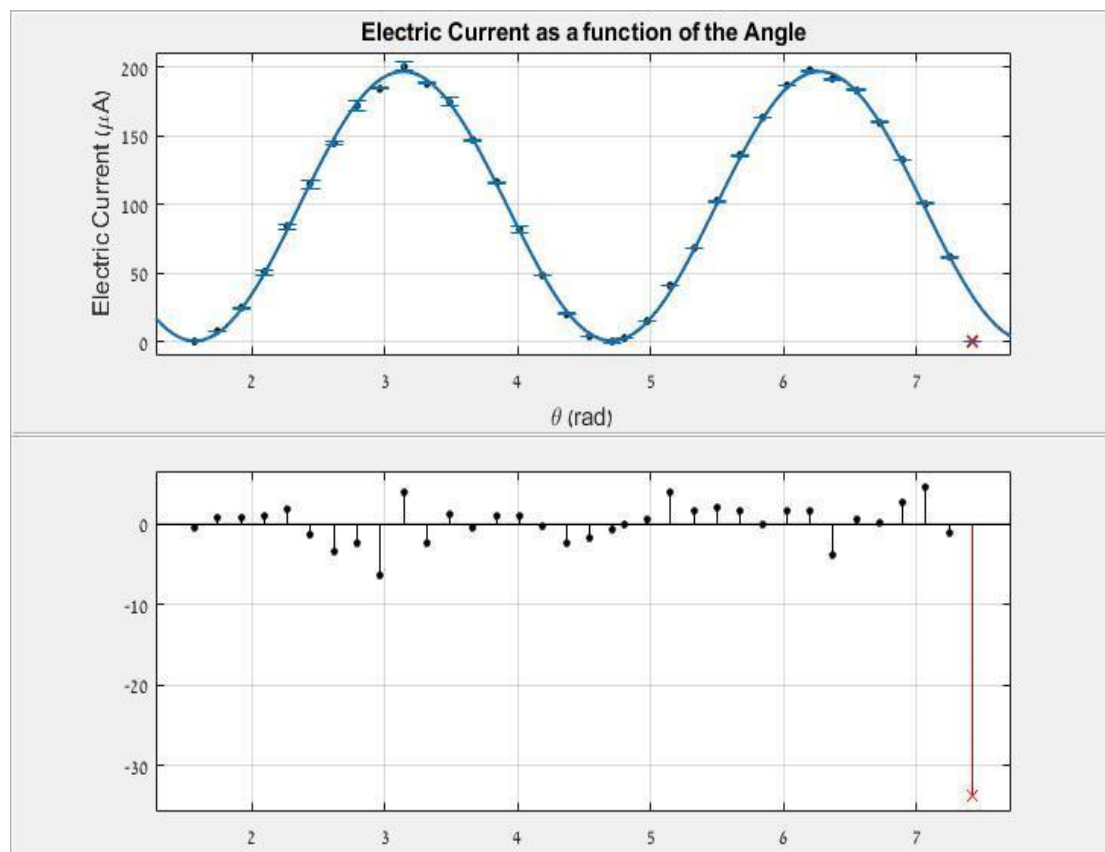
ניסיון שני למדידת אפקט פאראדיי – באמצעות חוק מאלוס – הניסוי שצלח

מערכת הניסוי נשארה כשהייתה, כמתואר באיור 5. עם זאת, מהלך הניסוי השתנה קלות – את המקטב השני השארנו על זווית קבועה (מוסט ב- $\frac{\pi}{4}$ מקבלת העוצמה המקסימאלית), ועבור כל שינוי שיצרנו בעוצמת השדה המגנטי (באמצעות הזרם החשמלי שהעברנו בסליל), מדדנו את עוצמת קרן הלייזר המתקבלת לאחר מעבר הקרן דרך המקטב הלינארי השני. הקשר בין עוצמת קרן הלייזר המתקבלת לזווית הקיטוב של האור נתונה לפי ניסוי העזר שערכנו. באופן זה הצלחנו לחלץ את זווית הקיטוב ולחפש קשר לתיאוריה. השינוי בעוצמת השדה המגנטי נוצר בעקבות זרם שהעברנו דרך הסליל.⁵

תיאור תוצאות

חוק מאלוס בשני מקטבים – תוצאות מדידת העזר

נזכיר שהמדידה הראשונה שערכנו הייתה מדידת עזר להבנת הקשר בין עוצמת השדה המתקבלת בגלאי לבין זווית הקיטוב של האור. להלן גרף המתאר קשר זה:



גרף 1: הגרף העליון מתאר את עוצמת האור כפונקציה של זווית הקיטוב.

הגרף התחתון הינו גרף שארים להתאמה.

⁵ תווך עוצמות הזרם היה (3, -3) אמפר.

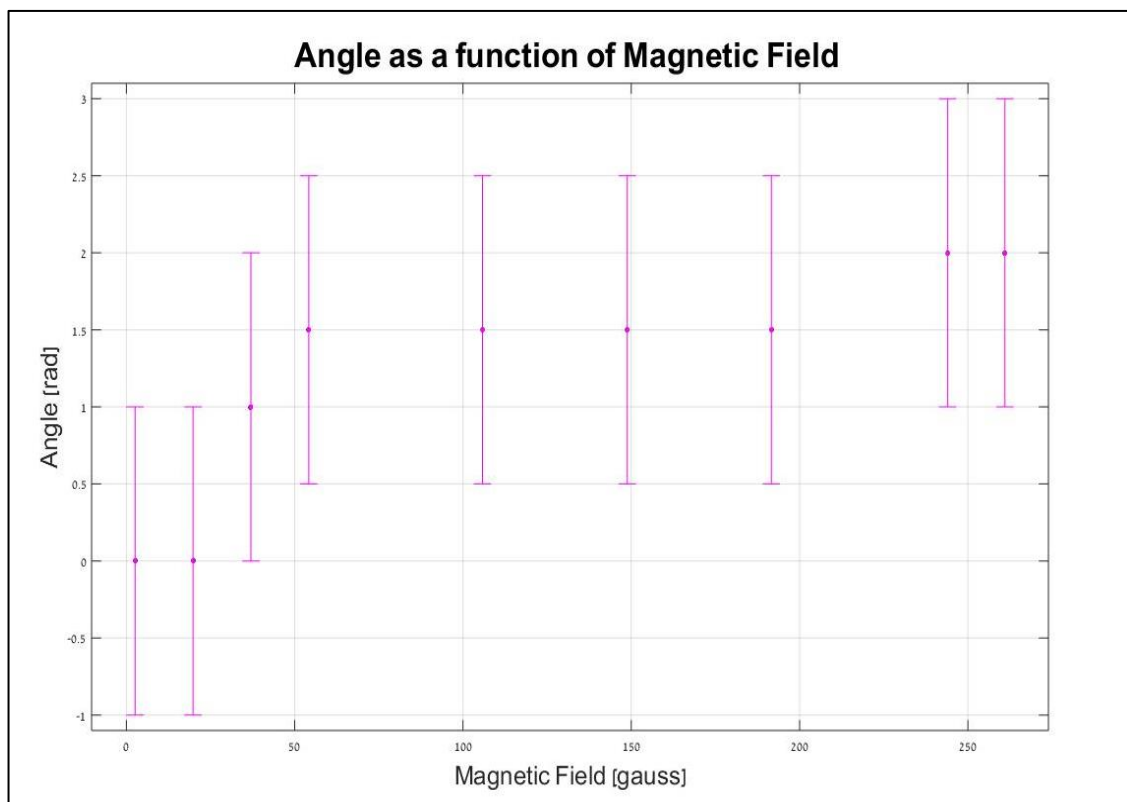
ערכנו התאמה לפונקציה באופן הבא: $I(\theta) = d + a \cos^2(b \cdot \theta)$, כאשר d מתאר את הערך המינימאלי של המדידה, אשר נובע מזליגת האור דרך המקטבים הלא אידיאליים אשר היו ברשותנו ומתאורת הרקע בחדר (כגון צגי מחשב, החזרות למיניהן וכו'), a הינו העוצמה של הקרן כאשר הפרש זוויות הקיטוב של שני המקטבים הינה 0 (למעשה a מתאר את I_0), ו b הינו מקדם הזווית למטרות התאמה בלבד (מתוך חוק מאלוס נובע כי b תיאורית שווה ל-1). להלן ערכי הפרמטרים לפי ההתאמה:

$$a = 196 \pm 1, b = 1.003 \pm 0.002, d = 1.0 \pm 0.6$$

ניתן לראות שערכי הפרמטרים תואמים את התיאוריה וכי ההתאמה טובה. לפי ההתאמה האמפליטודה היא $196 \pm 1 \mu A$ כאשר לפי המדידה שלנו העוצמה המקסימאלית היא $191 \pm 5 \mu A$. גרף השארים מתנהג בצורה שיטתית ונראה שקיימת מחזוריות מסוימת. הדבר נובע ככה"נ מהתנהגות מחזורית של הגלאי.

עוצמת האור כתלות בעוצמת השדה המגנטי המופעל על התווך

להלן הגרף המתאר את המדידה הראשונה שערכנו למציאת קבוע ורדה, השינוי בזווית הקיטוב כפונקציה של השדה המגנטי המופעל על גביש הקוורץ:



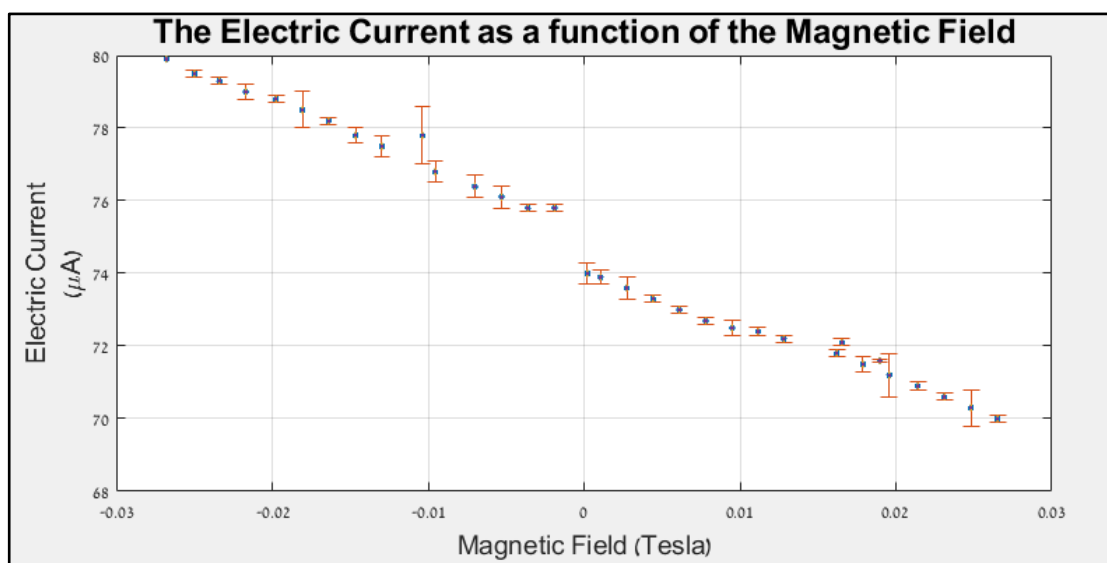
גרף 2: מדידות גולמיות של השינוי בזווית הקיטוב כתלות בעוצמת השדה המגנטי

ניתן לראות כי השגיאה של מדידת הזווית גדולה במיוחד ביחס לסדר הגודל של טווח השינוי, נרחיב על כך בפרק הדיון והמסקנות.

ערכנו מדידה נוספת. מדדנו את עוצמת האור כתלות בשדה המגנטי המופעל על הגביש. מדדנו את עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ⁶ וחיסרנו אותו מכל המדידות.

⁶ כ-1.9 גאוס

להלן גרף המתאר את תוצאות המדידה השנייה:



גרף 3: התוצאות הגולמיות של המדידה.

הגרף מתאר את עוצמת קרן הלייזר כתלות בשדה המגנטי אשר הופעל על הגביש.

ציפינו לקבל גרף המתאים לחוק מאלוס. מאחר שעוצמת הזרם שניתן היה להעביר בסליל הייתה מוגבלת, הגרף שהתקבל מתאר רק את החלק הליניארי בגרף הקוסינוס הריבועי. ידענו שיהיה לנו קשה לעשות התאמה לגרף שכזה ולכן החלטנו להמיר את התוצאות המתארות את תלות עוצמת הקרן בשדה המגנטי לנתונים של זווית הקיטוב כתלות בשדה המגנטי.

תחילה נחשב את I_0 , העוצמה המקסימאלית של קרן הלייזר לאחר העברתה במערכת הניסוי. קבענו את המקטב השני בהסטה של $\theta_0 = 45^\circ \pm 0.5 \text{ (deg)}$, ומדדנו תחילה את עוצמת הלייזר ללא הפעלה של שדה מגנטי חיצוני. לפי המדידה התקבל:

$$I(\theta_0 = \frac{\pi}{4}) = 74.8 \pm 0.2 \mu A^7$$

כעת ניתן לחשב את I_0 :

$$I_0 = \frac{I}{\cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right)} = 149 \pm 7 \mu A$$

החישוב הנ"ל תואם את ערך ה- I_0 הנמדד: $I_0 = 151 \pm 2 \mu A$.

כעת, בהינתן העוצמות אשר התקבלו בגלאי, נוכל לחשב את זווית הקיטוב של הקרן, לפי חוק מאלוס:

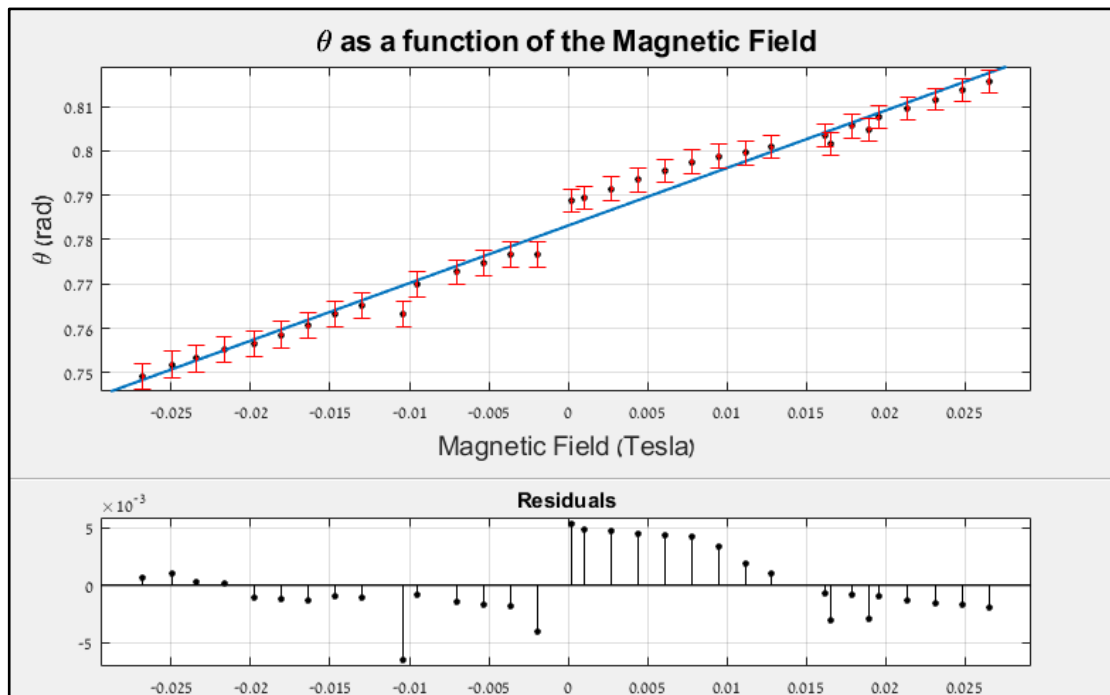
$$\theta = \cos^{-1}\left(\sqrt{\frac{I}{I_0}}\right)$$

לפי משוואה מספר 7, נצפה לקבל את הקשר הבא:

$$\theta = B \cdot v \cdot l$$

⁷ כל השגיאות בדו"ח חושבו לפי המשוואה: $\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \Delta x_i\right)^2}$ כאשר n הוא מספר המשתנים ב-f.

להלן גרף המתאר את הקשר בין זווית הקיטוב לעומת השדה המגנטי המופעל על הגביש :



גרף 4: הגרף העליון מתאר את תלות זווית הקיטוב של קרן הלייזר לשדה המגנטי אשר הופעל על גביש הקוורץ. הגרף התחתון הינו גרף השאריות להתאמה הליניארית.

ניתן לראות קשר ליניארי מובהק בין זווית הקיטוב לעוצמת השדה המגנטי. בעזרת כלי ההתאמה של Matlab חילצנו את שיפוע הגרף :

$$\text{slope} = 1.30 \pm 0.06 \text{ (rad/Tesla)}$$

לפי משוואת אפקט פאראדיי, שיפוע הגרף מתאר את מכפלת אורך המקטע בו עברה הקרן (במטרים) עם קבוע ורדה של החומר. קבוע ורדה התיאורטי הינו: $96 \text{ (rad/Tesla} \cdot \text{m)}$ עבור אורך הגל של הלייזר בו השתמשנו. אורך גביש הקוורץ באמצעותו ערכנו את המדידות הינו: $l = 0.0135 \pm 0.0001 \text{ (m)}$. נחלץ את קבוע ורדה מהשיפוע :

$$v = \text{slope}/l = 96 \pm 4$$

דיון ומסקנות

בניסוי זה רצינו לאשש את חוק מאלוס, ולהשתמש בחוק זה על מנת לבדוק את קיום אפקט פאראדיי. בחלק הראשון של הניסוי קיבלנו התאמה טובה הנראית הן בהתאמה של הפונקציה לגרף והן בערכי הפרמטרים של ההתאמה. ראינו שחוק מאלוס מתאר נכונה את התנהגות האור במעבר בין שני מקטבים, גם בתנאי מעבדה לא אידיאליים.

בחלק השני של הניסוי רצינו לאשש את אפקט פאראדיי וערכנו 2 ניסויים למטרה זו :

בניסוי הראשון חיפשנו את זווית הקיטוב של קרן הלייזר תוך שינוי השדה המגנטי המופעל בתוך. ניתן לראות בגרף 2 את תוצאות ניסוי זה, ולהיווכח כי לא ניתן להסיק מסקנות על סמך גרף זה, שכן השגיאה בכל מדידה גדולה במיוחד ביחס לערך הנמדד (ואף גדולה מהשינוי הנמדד). בדיעבד היה ניתן לצפות את הבעייתיות הגלומה בניסוי זה שכן השינוי הצפוי בין ערכי הזוויות הנמדדות הינו ערך נמוך במיוחד שכן ערך השיפוע התיאורטי של הגרף נובע ממכפלת אורך הגביש וקבוע ורדה⁸. כמו כן, סקאלת הזווית במקטבים איננה מספיק רגישה עבור גודל השינוי בזווית, ולכן לא ניתן היה למדוד באופן מדויק את השינוי. סיבה נוספת שהמדידה לא צלחה הינה רגישות הגלאי והתנהגותו המחזורית, אשר הפריעה במציאת ערך מדויק שהיה הכרחי עבור ניתוח התוצאות בסדרי גודל אלה.

⁸ ערך השיפוע התיאורטי: $\text{slope} \left[\frac{\text{rad}}{\text{gauss}} \right] = v \cdot l \cdot 10^{-3} = 96 \cdot 0.0135 \cdot 10^{-3} = 1.296 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{rad}}{\text{gauss}} \right]$

המדידה השנייה שערכנו בנושא אפקט פאראדיי התבססה על תוצאות הניסוי הראשון המאשר את חוק מאלוס. על מנת להתמודד עם הקושי למצוא את זווית הקיטוב באמצעות חיפוש פיזי של זווית העוצמה המקסימאלית במקטב, מדדנו את עוצמת קרן הלייזר והסקנו את זווית הקיטוב. את תוצאות הניסוי ניתן לראות בגרף 4. ציפינו לקבל התאמה לינארית, לחלף את קבוע מתוכה, ולהשוותו לקבוע ורדה התאורטי. קיבלנו תיאום מדויק בין קבוע ורדה התאורטי לזה הנמדד⁹, כלומר, הניסוי עמד בציפיות שלנו. ניתן לראות כי בגרף קיימות מדידות אשר חורגות מההתאמה הלינארית וכי ההתאמה לא נכללת בתווך השגיאה המוערכת שלנו. ניתן לשאר כי חריגות אלו נובעות משילוב של מספר גורמים בהם הבחנו במהלך הניסוי; סליל המתכת התחמם במהלך הניסוי וייתכן שהדבר השפיע על קבוע ורדה, שכן אנו יודעות כי קבוע זה מושפע גם מהטמפרטורה הגבוהה. ייתכן שלא הערכנו מספיק את שגיאות המכשירים איתם עבדנו, בדגש על הגלאי הפוטו-וולטאי אך גם מד השדה המגנטי. נציין גם כי את מדידת השדה המגנטי ערכנו באמצעות חיישן אשר הודבק באופן ידני לדפנות הסליל, וייתכן כי הדבקה זו לא קיבעה את החיישן באופן יציב מספיק. למרות הנ"ל, ועל אף השגיאות, ניתן לראות כי תוצאות הניסוי הינן חד משמעויות ומוכיחות את התופעה שציפינו לראות.

סיכום

המסקנה העיקרית שלנו מהניסוי הינה שהעברת קרן אור דרך שדה מגנטי אכן יוצרת שינוי בזווית הקיטוב, וכי שינוי זה יתאם באופן לינארי לעוצמת השדה המגנטי. נהנו לחקור את התופעה המעניינת של אפקט פאראדיי והיינו שמחות להמשיך ולחזות בתופעה באה לידי ביטוי באמצעות ניסויים נוספים, כגון שינוי הטמפרטורה של הגביש – והשפעת שינוי זה על קבוע ורדה. ניסוי נוסף יכול להיות שימוש בלייזרים בעלי אורכי גל שונים והשפעתם על קבוע ורדה. כמו כן ניתן לערוך מדידות עם גבישים שונים בעלי קבועים שונים ולחזות בתופעת אפקט פאראדיי באה לידי ביטוי בשיפועים שונים.

⁹ קבוע ורדה התאורטי הינו 96, וקבוע ורדה הנמדד הינו: $v = 96 \pm 4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}} \right]$

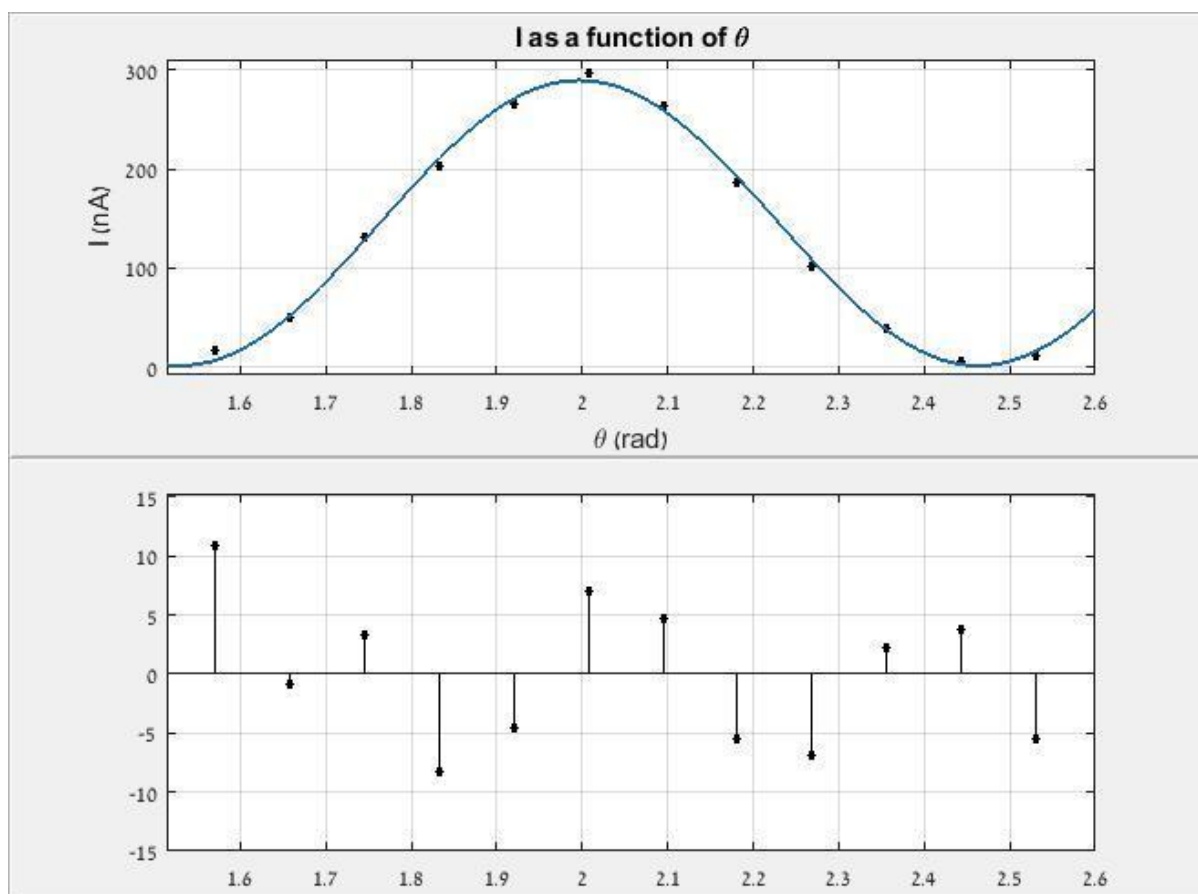
שבוע 1 - חוק מאלוס בין 3 מקטבים

סובבנו את המקטב האמצעי, המקטב הראשון והשלישי הוצבו מאונכים זה לזה.

בדקנו שהמקטבים ניצבים זה לזה ע"י הוצעת המקטב האמצעי - כאשר לא היה מעבר של אור ידענו שהם ניצבים.

הטווח שמדדנו: $\cos^2(\theta) * \cos^2(\pi/2 - \theta) = 1/4 \cdot \sin^2(2\theta)$ (משום ש-

להלן גרף המתאר את עוצמת קרן הלייזר כפונקציה של זווית הקיטוב של המקטב האמצעי.



נקודות המינימום בשני צידי הגל לא שוות, דבר המצביע על כך שהלוחיות (1-3) לא היו ניצבות במדויק.

להלן נתוני ההתאמה:

General model:

$$f(x) = a * (\sin(b * x + c))^2$$

כאשר:

$$a = 290 \quad (272.9, 307.1)$$

$$b = 3.159 \quad (3.029, 3.288)$$

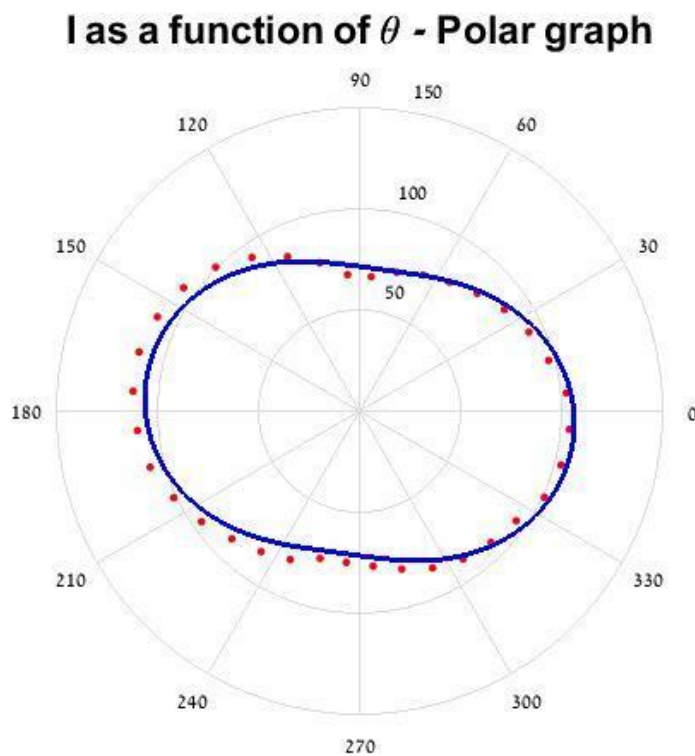
$$c = -1.61 \quad (-1.891, -1.329)$$

לוחית רבע גל:

הנחנו את המקטבים ואת הלוחית כך שמעבר הקרן היה מינימאלי, וסובבנו את הלוחית ב-45 מעלות.

לאחר מכן, ציפינו שכאשר נזיז את המקטב נקבל ערכים זהים לאורך הסיבוב, אך זה לא קרא - ככל הנראה לא מצאנו את הציר האופטי המדויק של הלוחית. קיבלנו קיטוב אליפטי.

להלן הגרף הפולארי:



להלן נתוני ההתאמה:

General model:

$$f(x) = a + b * (\cos(x * \pi / 180 - c))^{2 + x * d}$$

כאשר:

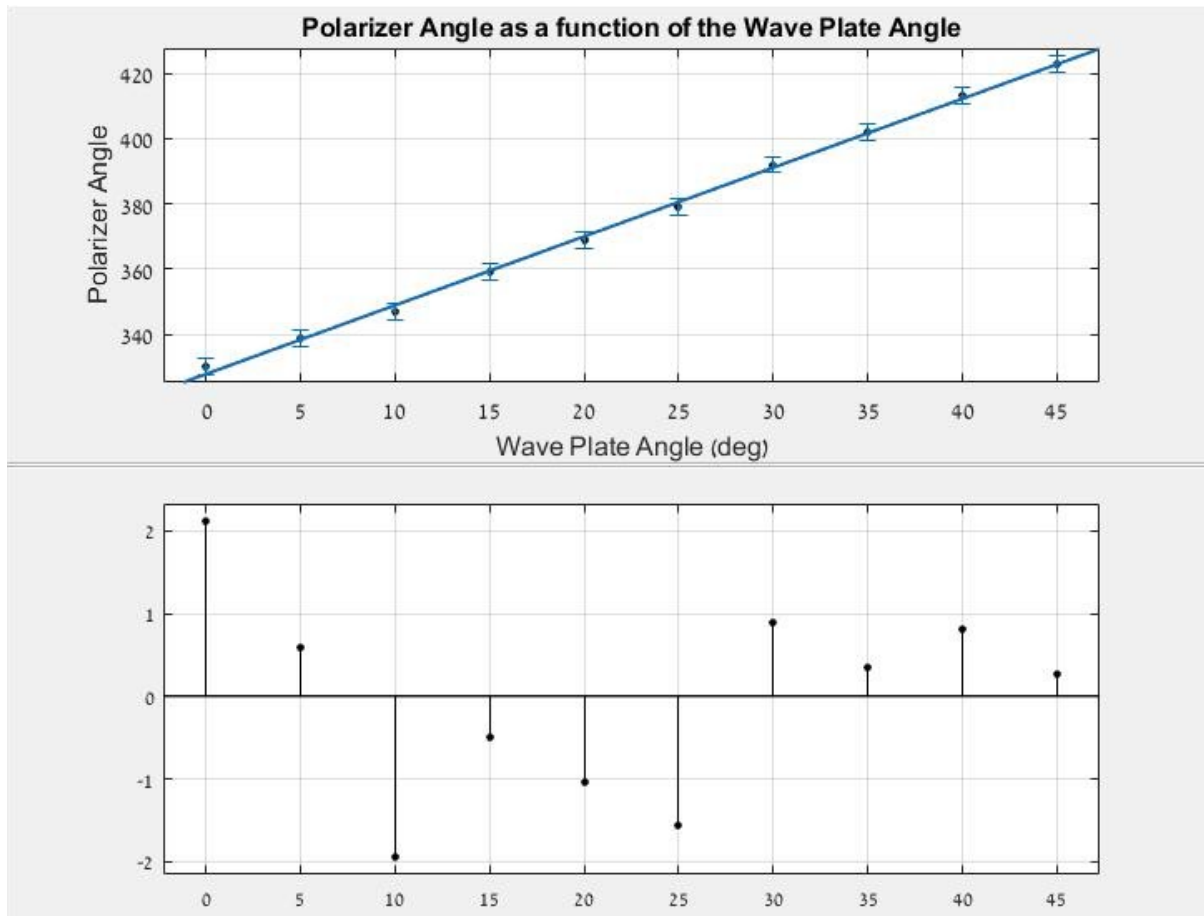
$$a = 70.88 \quad (67.47, 74.3)$$

$$b = 35.83 \quad (31.85, 39.81)$$

$$c = -9.564 \quad (-9.623, -9.504)$$

$$d = 0.01172 \quad (-0.003007, 0.02644)$$

לוחית חצי גל:



להלן נתוני ההתאמה:

General model:

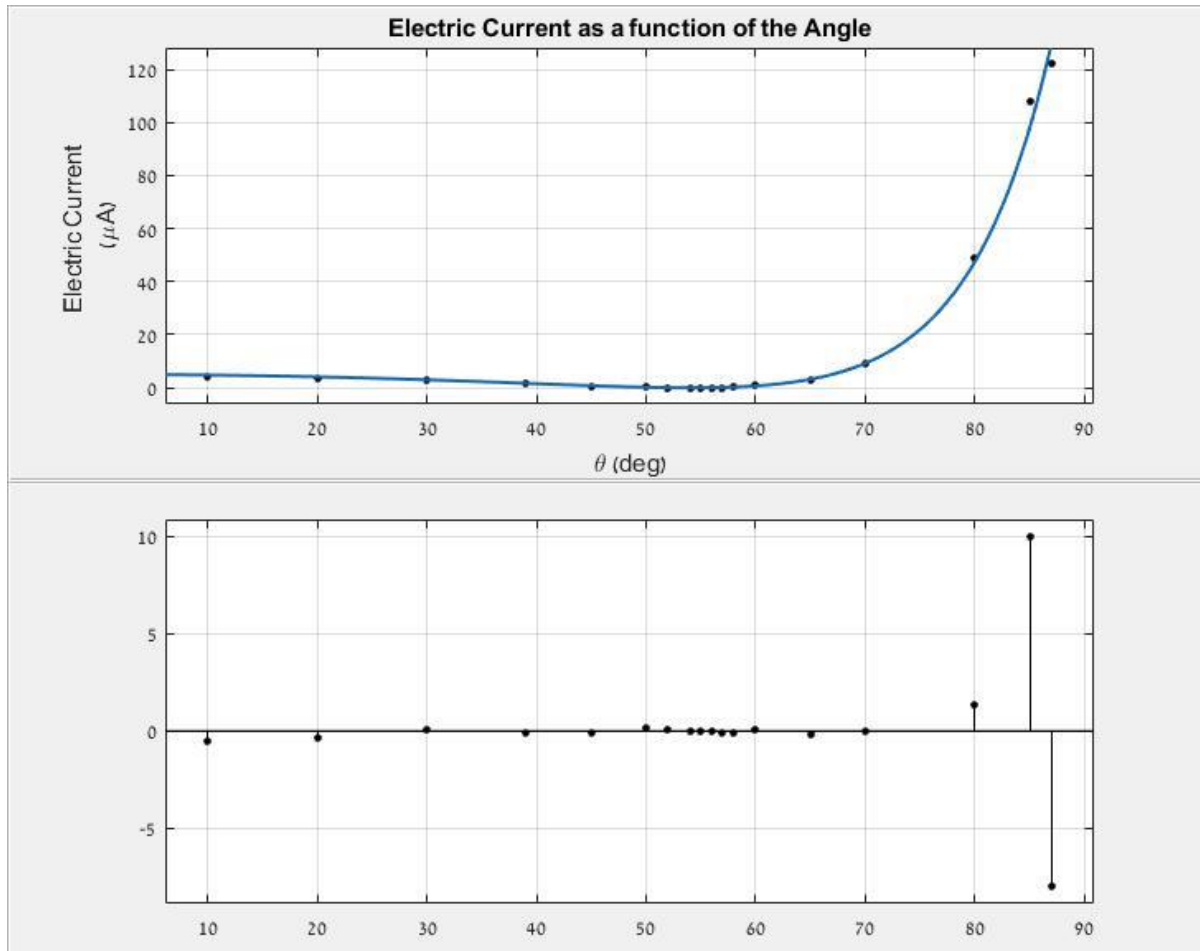
$$f(x) = b + a \cdot x$$

כאשר:

$$a = 2.041 \quad (1.994, 2.087)$$

הפרמטר b מתאר את הזווית ההתחלתית ואינו רלוונטי להוכחת הקשר הליניארי.

להלן גרף המתאר החזרה מתווך דיאלקטרי, כאשר האור פוגע בתווך במקביל למישור הפגיעה:



להלן נתוני ההתאמה:

$$f(x) = b * ((\sqrt{1 - ((1/a) * (\sin(x)))^2} - a * \cos(x)) / (\sqrt{1 - ((1/a) * (\sin(x)))^2} + a * \cos(x)))^2$$

כאשר:

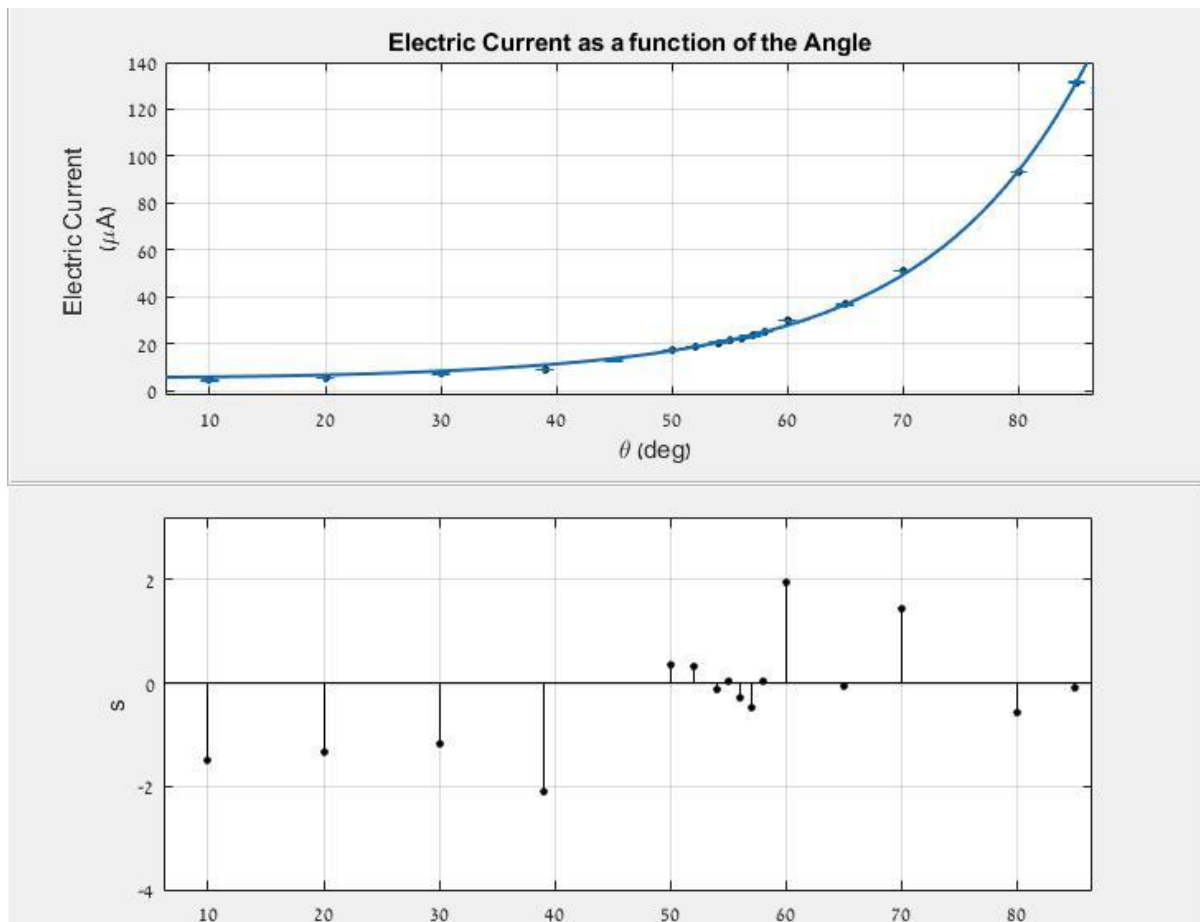
$$a = 1.379 \quad (1.183, 1.575)$$

$$b = 197.9 \quad (189.7, 206)$$

הפרמטר a מהווה את מקדם ההחזרה של החומר.

השגיאות היו זניחות ועל כן הושמטו מהגרף.

להלן גרף המתאר החזרה מתווך דיאלקטרי, כאשר האור פוגע בתווך בניצב למישור הפגיעה:



להלן נתוני ההתאמה:

$$f(x) = b * ((\cos(x) - a * \sqrt{1 - ((1/a) * (\sin(x)))^2}) / (\cos(x) + a * \sqrt{1 - ((1/a) * (\sin(x)))^2}))^2$$

כאשר:

$$a = 1.483 \quad (1.426, 1.541)$$

$$b = 167.5 \quad (158.5, 176.5)$$