

## תכונות של סיבים אופטיים ושל לייזר דיודה

עודכן לאחרונה: 12.03.2016

### ספרות:

- [1] חוברת הניסוי מהמעבדה Projects in Fiber Optics (פרקים 0,1,10)  
[2] Coherence and Fringe Localization, T.D. Milster and N.A. Beaudry  
[3] חוברת הניסוי מהמעבדה: Projects in Single-Mode Fiber Optics: (פרק 3)  
[4] 535.15YAR Optical Electronics, A. Yariv (פרק 11)  
[5] 621.369.2SNY Optical Waveguide Theory, A.W. Snyder and J.D. Love

### מטרות הניסוי :

מעבדה זו כוללת מספר ניסויים בסיבים אופטיים ולייזרים. המטרה היא להכיר תיאורטית ומעשית את הנושא של סיבים אופטיים. בניסוי תעבדו על פי חוברות ( Projects in Fiber Optics ) שבהן נתון חלק מהחומר התיאורטי הדרוש להבנת הנושא ותאור הניסויים שיתבצעו.

במעבדה יתבצעו הניסויים הבאים:

ניסוי 1 - מדידת המפתח הזוויתי , N.A של הסיב.

ניסוי 2 - אינטרפורמטר מסיבים אופטיים.

ניסוי 3 - אופיין לייזר דיודה

ניסוי 4 - מחקר תכונות הקוהרנטיות של לייזר דיודה.

מומלץ מאד להביא לפטופ לניסוי כדי לעבד נתונים בזמן המדידה.

## שאלות הכנה

1. גלים אלקטרומגנטיים - כללי

א. הסבירו מה הוא קיטוב ליניארי ומעגלי ותארו התקן לקיטוב אור.

ב. הסבירו את המושג "קוהרנטיות מרחבית" ואת את המושג "קוהרנטיות זמנית"

2. העזרו במקור [5] (פרק 1, פרק 13 סעיף 14, פרק 36 סעיפים 11,12)

א. הסבירו את עקרון פעולת סיב אופטי מסוג  $\text{step index}$  בתשובתכם התייחסו למושגים הבאים:

Critical angle, Numerical aperture, V-number, Modes Single-mode and multimode fibers.

ב. מה ההבדל בין סיבי  $\text{step index}$  לבין  $\text{graded index}$ ?

ג. הסבירו בקצרה, כיצד מתקבל הביטוי עבור פרמטר הסיב  $V$  כאשר  $V \gg 1$  מספר המודים

בסיב נתון בקירוב טוב ע"י הנוסחה:  $N \cong \frac{V^2}{2}$ . חשבו את מספר המודים ואת המפתח הנומרי

עבור  $\lambda = 633 \text{ nm}$  בסיב מסוג FMLD-50,  $n_{\text{core}} = 1.46$ ,  $d_{\text{core}} = 100 \mu\text{m}$ ,  $n_{\text{clad}} = 1.47$ ,  $d_{\text{clad}} = 140 \mu\text{m}$

ד. כיצד מוגדר המפתח הנומרי של סיב? כיצד נמדוד אותו בניסוי (מקור [1] פרק 1)? מדוע לדעתכם אסור למקד את קרן הלייזר אל תוך הסיב במדידה זו?

3. העזרו בפרק 10 ממקור [1] ובמקור [2]

א.מהם אינטרפרומטרי Michelson ו Mach-Zehnder? מה ההבדל בינם ולמה הם

משמשים? מה מתרחש בסיב בניסוי מדידת טמפרטורה?

ב. מה ההפרש המרבי בין הדרכים האופטיות של שתי זרועות האינטרפרומטר לקבלת תבנית התאבכות?

4. לייזר דיודה העזרו במקור [4] פרק 11

א. הסבירו מהו חצי מוליך מסוג n-type ו-p-type. הסבירו מה מתרחש בצומת pn. כיצד משמש התקן זה כגלאי פוטונים (פוטו-דיודה)?

ב. הסבירו כיצד פועל לייזר דיודה. במה הוא שונה מ-LED? התייחסו לרוחב הספקטרלי ולתכונות הקוהרנטיות.

5. תכונות הקוהרנטיות של לייזר קראו במקור [2] בהקדמה ועד סוף סעיף 5.1.1 ואת

סעיף 5.1.3, קראו בפירוט את סעיף 5.1.4 ואת דוגמא 5.4

א. לפי סעיף 5.1.4, מהו הקשר בין ספקטרום האנרגיה  $a^2(v)$  לבין הניראות  $V(y_0)$ ?

**ב.** בניסוי תמדדו את הנראות כתלות בהפרש הדרכים הגס  $V(y_0)$ . לאור סעיף א. אילו צעדים יש לבצע על ספקטרום האנרגיה של הלייזר (הנתון מראש) בכדי לחשב את העקומה ה"תיאורטית" של הנראות?

### כללי זהירות!!

- 1.** במעבדה זו לייזר HeNe ולייזר דיודה בהספק  $\sim 5\text{mw}$ . קרן הלייזר הפוגעת בעין מרוכזת ע"י עדשת העין על הרשתית לכתם שקוטרו מסדר גודל של  $1\mu\text{m}$  כתוצאה מכך עלולה להתקבל צפיפות אנרגיה גדולה שתחולל נזק בלתי הפיך ברשתית - עד עיוורון. לכן:
  - א.** העבודה תמיד עם משקפי מגן. אין להביט ישירות לתוך קרן הלייזר, גם כאשר זו מועברת בעזרת הסיב.
  - ב.** יש להיזהר מקרנים המוחזרות מאלמנטים אופטיים במערכת.
  - ג.** יש להפעיל את הלייזר רק לאחר שהוא נעול במחזיק.

דיודת הלייזר איתה נעבוד בחלקו השני של הניסוי פולטת קרינה בלתי נראית באורך גל של  $780\text{nm}$ . חשיפה של העין לקרינה ישירה יכולה לגרום לעיוורון מידי! לכן:

- א.** חובה להרכיב את משקפי המגן המתאימות לאורך הגל הזה במשך כל זמן העבודה של הלייזר.
- ב.** יש להדליק את האור האדום ולהקפיד על דלת סגורה כאשר הלייזר פועל.
- ג.** אין לאפשר כניסה של אנשים נוספים לחדר בו ממוקמת המערכת כאשר הלייזר פועל.

### ניסוי 1 - מדידת המפתח הזוויתי - NA של הסיב.

התדריך נמצא בשלמותו במקור [1], פרק 1. אנא עקבו במדויק אחר ההוראות. **טיפ חשוב לכל הסעיפים: שום דבר לא הולך בכוח במערכת הזו.** אם לבורג או ידית יש התנגדות אפילו קטנה, עצרו ונסו להבין אם יש מנגנון שנועל את ההזזה הרצויה. אם לא מצאתם אחד, קראו למשה או למדריך.

**טיפ נוסף:** כשהסיב חתוך כהלכה, ההספק שיוצא מהסיב צריך להיות גדול מ-20 מיקרו-וואט. מומלץ לבצע את הניסוי בחושך, מפני שתאורת החדר מוסיפה רעש למדידות.

**בדו"ח:** הציגו גרף של העוצמה היחסית (%) כתלות בסינוס זווית הכניסה. הציגו את הגרף כשסקלת העוצמה היא לוגריתמית, כדי לראות בבירור יותר מה קורה מסביב ל-5%.

## ניסוי 2 - אינטרפרומטר מסיבים אופטיים.

בחלק זה נבנה אינטרפרומטר מסוג Mach-Zender שימדוד שינויי טמפרטורה בסיב אופטי. עליכם למצוא את קבוע הקירור (מחוק הקירור של ניוטון) ע"י מדידת תבנית ההתאבכות שמתקבלת מקירור סיב אופטי, וכן להראות התאמה לתיאוריה. יש למדוד את שינוי תבנית ההתאבכות לאורך זמן עבור קירור של מס' אורכים שונים של סיב. הכוונון של האינטרפרומטר דורש מעט סבלנות אך התוצאה מתגמלת. אני ממליץ לבצע אותו כשאתם רגועים, זכרו שיש המון זמן לביצוע המדידות במעבדה ג' ומומלץ לצאת להפסקה של 10 דקות, במהלכה הרבה פעמים מבינים מה לשפר, ולשוב רעננים.

1 הוציאו את מפצל הסיבים בעל ארבעת הקצוות מהקופסה. הכניסו את הכניסה הלבנה (בצד השחור-לבן) אל מחזיק הסיבים שמול עדשת האובייקטיב. את היציאה הלבנה החזיקו עם מחזיק סיבים מול מד הספק.

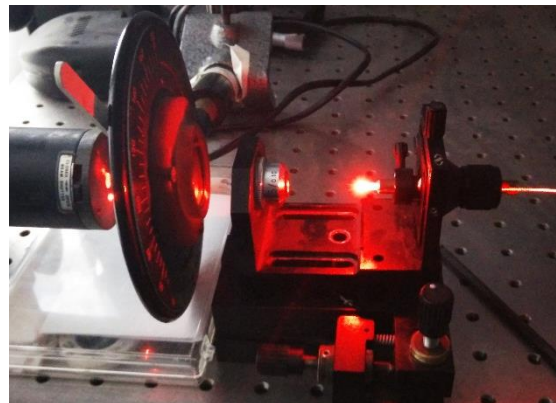
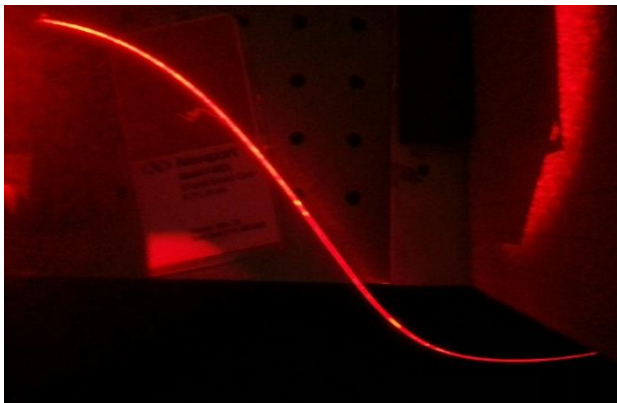
1.1 צמדו את הלייזר דרך עדשת האובייקטיב לכניסה הלבנה. **אין להסתכל על הכתם הממוקד ללא משקפי בטיחות.** דאגו להגיע למקסימום הספק ע"י כיוונון של כל דרגות החופש:

1.1.1 בלייזר: גובה, הטייה בשני צירים.

1.1.2 במת הצימוד: הטייה בשני צירים.

1.1.3 מחזיק הכניסה הלבנה: הסטה בשני צירים.

1.2 בשלב זה כל הסיב אמור לזהור באדום כמופיע באיור 1. **הציבו מקטב מול הלייזר.** כווננו את הקיטוב כך שתתקבל עוצמה מקסימלית במד ההספק. בשלב זה, ההספק בכל אחת מהיציאות אמור להיות **לפחות 1 מיקרו-וואט** (נסו לקבל יותר מ3 מיקרו-וואט).



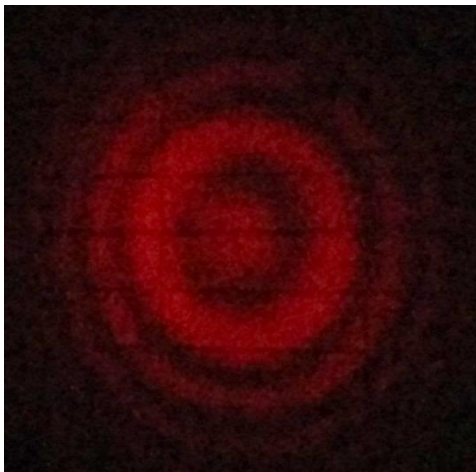
איור 1 ימין: צימוד נכון בין הלייזר לסיב, בסיום שלב 1.2. שמאל: סיב זוהר בעת צימוד נכון..

2 הניחו את היציאה הכחולה והלבנה במחזיקי הסיבים של האינטרפרומטר. צריכה להיות מספיק עוצמה כדי לראות בבירור נקודת אור אדומה על נייר מול קצה הסיב ביציאה. **כבו את הלייזר** והורידו את משקפי הבטיחות. כווננו את הסיבים כך שיהיו בגובה הנכון

וממורכזים ביחס לפאות של מפצל הקרן. הדליקו שוב את הלייזר ובצעו את שלושת המבחנים הבאים:

2.1 הניחו את העדשה המרכזת ביציאה הימנית של האינטרפרומטר וקבלו דמות של שני הכתמים האדומים על מסך נייר רחוק. כווננו את מרחק הסיבים ממפצל הקרן עד ששני הכתמים ממוקדים לחלוטין (איור 2- לפני ואחרי). לאחר מכן הביאו את הכתמים על המסך לכדי חפיפה.

2.2 שימו את המסך מול היציאה השנייה, רחוק ככל הניתן כשעדיין רואים כתם אדום המורכב משני כתמים. כעת חיסמו לחילופין את אחד הסיבים והבחינו בתוצאה על המסך. נצפה לראות שאחד הצדדים של הכתם מהבהב, כדי לתקן זאת כווננו את המערכת תוך שימוש בדרגות חופש אחרות מאלו שהשתמשם בסעיף a. ניתן עתה לבצע מבחן זה גם כאשר המסך מאד מאד קרוב למפצל הקרניים כדי לוודא שהקרניים מקבילות ולא רק חופפות. בשלב זה כדאי למלא את הדיואר בקרח ומי ברז ע"מ שיגיע לשיווי משקל של מי קרח ב0 מע' צלסיוס. אם מתחילים להראות סימני תבנית התאבכות (איור 3), עברו לסעיף 3. אם לא, נסו לחזור על סעיפים 2 עד 2.2 (בדקו שוב שקרני האור פוגעות במפצל הקרן המאונך ובמרכז)



איור 2 כתם האור כאשר האינטרפרומטר איננו מכוון (ימין) וכאשר הוא מכוון (שמאל) ניתן לראות 4 פסים שחורים מהמרכז ושמאלה. לביצוע המדידות יש לקבל לכל היותר 2 פסים שחורים.

3 אם קיבלתם תבנית התאבכות של פסים אנכיים – עליכם להזיז את אחד הסיבים ימינה או שמאלה. אם התבנית אופקית – הזיזו אחד הסיבים למעלה או למטה עד שתקבלו תבנית של מעגלים קונצנטריים ממורכזים במרכז הכתם. **כל הכבוד!** לפני שאתם ממשיכים הלאה לסעיפים חשבו על השאלות הבאות:

- בטמפרטורה קבועה – איך תיראה תמונת ההתאבכות?
- אם הטמפרטורה משתנה לינארית בזמן - איך תשתנה תמונת ההתאבכות בזמן?
- ע"פ חוק הקירור של ניוטון הטמפרטורה משתנה אקספוננציאלית בזמן. איך תשתנה תמונת ההתאבכות בזמן?

4 ביצוע מדידת הטמפרטורה: הציבו את הפוטו-דיודה מול הכתם. קרבו או הרחיקו את אחד הסיבים **בעדיניות** כדי להגדיל את התמונה כמה שיותר – המטרה כאן היא לקבל על הגלאי רק עיגול אחד ענק שמשנה את עוצמתו מאדום לשחור (בגלל אי יציבות המע'). הדליקו את הסקופ וודאו שהסיגנל חזק והסקופ מכוון כראוי. לצורך בדיקה אפשר ללפף את היד סביב אחד הסיבים ולראות שהכתם מתחלף מאדום לשחור מספר פעמים כתגובה לחום הגוף שלכם. בחרו וסמנו בסלוטייפ **עדין** את אורך הסיב שתמצאו להכניס למי הקרח. אורך זה קובע את הרגישות במדידת הטמפ' אך גם את מספר הפסים שיספרו. כדאי לנסות מספר אורכים שונים ולקחת את הפשרה הכי טובה בין רגישות ושגיאה סטטיסטית.

- 4.1 לחצו על כפתור Stop, כוונו את הסקופ ל-5 שניות למשבצת, הטבילו את הסיב במי הקרח.
- 4.2 כשאתם מוכנים, לחצו על כפתור Run ומיד לאחר שמופיע סיגנל, הוציאו את הסיב במהירות והניחו במהירות על השולחן. לחצו על כפתור Stop פעם אחת בלבד כך שהוא יהבהב באדום-ירוק. המדידה תעצור כשהמסך יתמלא בסיגנל.
- 4.3 כעת שימרו את הקובץ על דיסק און קי. **חשוב: שנו את הגדרת Data Depth כדי שתהיה Maximum, מומלץ גם לשמור תמונה של המסך.**
- 4.4 חובה לבדוק את הנתונים שנשמרו על מחשב באקסל. במידה ואין לכם, גשו לאחד המחשבים במעבדה. ודאו שאכן הקובץ נטען ושהנתונים ברזולוציה גבוהה (דוגמא לקובץ שנשמר בהגדרת Data Depth לא נכונה מופיעה **באיור 6**).
- 4.5 **טיפ לעיבוד:** לכל מדידה יש את הרעש שלה. לפעמים יקל עלינו אם נסנן החוצה תדרים שהם רעש בצורה מובהקת. דוגמא טובה לכך היא רעש ב-50 הרץ והכפולות המתאימות (100 ולפעמים גם 150 הרץ) שנובע ממנורות פלורסצנט ורעשים חשמליים אחרים. כלי מומלץ לסינון רעשים במישור פורייה, לאחר ביצוע הטרנספורם: (הלינק מופיע גם באתר הניסוי)

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25017-fft-filter-clean-your-signals-and-display-results>

לאחר שסיימתם את **ניסוי 2** התייעצו עם המדריך בקשר להמשך המעבדה. ישנן 2 אפשרויות: כתיבת סימולציה ב-MATLAB או מדידת הספקטרום של לייזר דיודה.

**ניסוי 2.5 – סימולציית MATLAB (אופציונאלי, במקום ניסוי 3 ו-4)**

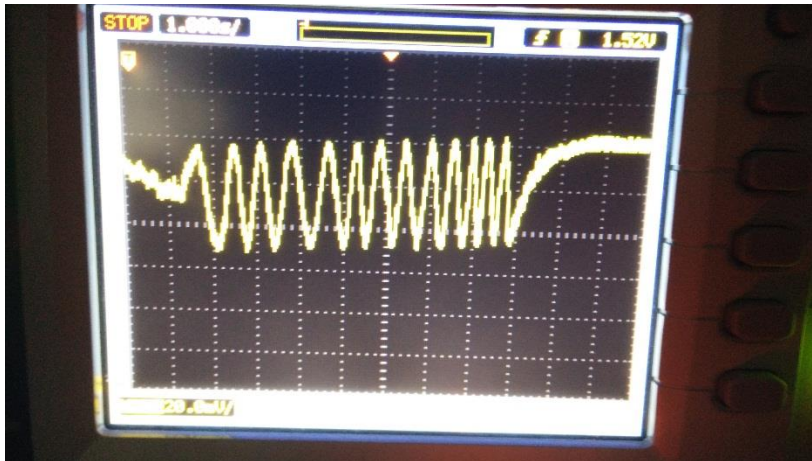
**ניסוי 3 – אופיין לייזר דיודה**

הניחו מד הספק מול יציאת האינטרפרומטר מייקלסון. הדליקו את לייזר הדיודה ומדדו גרף של ההספק במוצא כתלות בזרם בדיודה ע"מ לחלץ את זרם הסף ללזירה. בצעו שתי התאמות לינאריות, לפני ואחרי סף הלזירה, ומצאו את נקודת החיתוך בין הישרים.

#### ניסוי 4 - מחקר תכונות הקוהרנטיות של לייזר דיודה

- בניגוד לניסוי 2, כאן האינטרפרומטר מורכב במלואו ומוכן לפעולה. בניסוי תמדדו את ה Visibility כתלות במיקום המראה הניידת.
1. לפני תחילת המדידות, עליכם לודא ששתי הקרניים חופפות על הגלאי. לשם כך כוונו את הגלאי לקבלת סיגנל מירבי, עתה שימו את הכרטיס הפלורסנטי בצמוד לגלאי וחיסמו כל פעם זרוע אחרת בעזרת פיסת נייר או קרטון. עליכם לראות שאין שום תזווה בכתם כך ששתי הקרניים נופלות בדיוק זו על זו.
  2. כוונו את הזרם ל 58.5 מילי-אמפר בדיודה, כדי לשמור על תאימות עם הספקטרום הקיים באתר המעבדה. יש להציב את המקטב מול הגלאי ולהשתמש בו כמנחת, כדי להנחית את עוצמת הלייזר עד שהגלאי מראה 1.5-1.6 וולט במוצע (אם אתם מקבלים ערכים בסביבות ה 10 וולט – יש לשנות את ערך ה Probe ל X1 בתפריט של ערוץ 1)
  3. הגדרת הסקופ:
    - 3.1. קבעו את הסקופ על 1 sec/div, 10mV/div ולצימוד AC, אשר מציג את הנתונים לאחר שעברו סינון DC. לכן, לחצו על כפתור ה Vertical shift כדי לאפס את ההיסט.
    - 3.2. בשלב זה אתם אמורים לראות את הסיגנל היטב על המסך. הדליקו את ספק המתח של הגביש הפייזואלקטרי וסובבו את חוגת המתח מ 0 ל 40 וולט. הסיגנל הנוצר אמור להיות דומה לגל סינוס.
  4. את מיקום המראה הניידת מדדו לפי קריאת המיקרומטר על במת המראה.
  5. מציאת "ראשית" האינטרפרומטר: סרקו בעדינות עם המראה בין 9 ל 13 מ"מ ושימו לב לסיגנל בסקופ. חפשו מיקום שבו יש תוספת רעש פתאומית (עובי הקו של הסיגנל מתרחב ומשתגע מעט)
  6. את ה Visibility במיקום הנ"ל מדדו ע"י סיבוב של חוגת המתח לגביש הפייזואלקטרי והקלטת תמונת ה"סינוס" בסקופ. שימו לב לסובב מספיק מהר כדי שתדר הסינוס יהיה גדול בהרבה מתדר הסינון של מצב צימוד AC!! אם מסובבים לאט מדי, המדידה תתעוות. ניתן להעריך בצורה גסה (לא לדו"ח) ע"י הכנסת מדידת Vpp בתפריט measure. אם פגעתם בראשית (הפרש דרכים אופטיות אפס), משרעת הסינוס צריכה להיות מסדר גודל של 10-60 מילי-וולט, בעוד שחצי מ"מ מהמיקום הנ"ל נמוכה לפחות פי 3. שמרו את הנתונים לדיסק און-קי כאשר Data Depth = Maximum ובמחשב, חלצו את האמפליטודה של

הסינוס, שהיא המדד ל Visibility. בדקו את התוצאה פעם אחת במחשב וודאו שהסינוס באקסל נראה דגום היטב.



- קוהרנטיות גבוהה – משרעת הסינוס גדולה בהרבה מ"עובי" הקו.
7. בצעו סריקה של המראה הניידת (סיבוב המיקרומטר) ובכל נקודה הקליטו 3-4 מחזורים של ה"סינוס" שמתקבל ע"י סיבוב של חוגת המתח לפיזו.
  8. עיבוד התוצאות של ניסוי זה: היעזרו בטיפ 4.5 שבניסוי 2! הורידו את הספקטרום של הלייזר מאתר המעבדה.
  9. בצעו על הספקטרום (ולא על המדידה שלכם) טרנספורם פורייה (דוגמא מצורפת בנספח א'), כדי לקבל (עד כדי scaling בציר y) את גרף ה Visibility כתלות במיקום המראה. הציגו את העקומה התיאורטית ועל גביה הנקודות הניסיוניות אותן מדדתן. דונו בהתאמה או בסיבות לחוסר ההתאמה.

### נספח א' – ביצוע טרנספורם פורייה ב Matlab

בהנתן ספקטרום כתלות באורך גל אותו אנחנו רוצים להעביר טרנספורם פורייה, צריך:

- להפוך אורך גל למספר גל ( $m^{-1}$ )
- חשוב: כעת קצב הדגימה אינו קבוע מפני שהיחס בין אורך ומספר הגל אינו לינארי. יש לבצע אינטרפולציה כדי לייצר עמודת מספר גל בעלת קצב דגימה קבוע.
- למצוא את תדר נייקוויסט ולבנות את וקטור "הפרש הדרכים האופטיות" - ממינוס עד פלוס תדר נייקוויסט בעל אותו מספר דגימות. שימו לב שהזזת המראה אחורה ב 1 מ"מ מגדילה את הפרש הדרכים ב 2 מ"מ.

ביצוע טרנספורם פורייה והצגת הטרנספורם והמדידות אחד על השני.

קוד לדוגמא:

```
Input = dlmread('I_58.55ND2B.csv',' ',5,0); % Read input. Start from 5th row to avoid
reading junk info on header.
lambda = Input(:,1); % [nm]
I = Input(:,2); % [arb. units]
N = length(lambda);
lambda = lambda*10^-9; % Convert wavelength to meters
k = linspace(1/lambda(1),1/lambda(end),N); % [m^-1] Force uniform sampling for the
definition of Nyquist frequency
```



```
I_k = interp1(1./lambda,I,k); % Interpolate I accordingly
nyq = 1/(2*(k(2)-k(1))); % Get Nyquist's frequency
x = linspace(-nyq,nyq,N); % Produce x vector range
I_ft = fftshift(fft(I_k));
plot(x*10^3,abs(I_ft)); xlabel('Interferometer path difference, mm'); xlim([-nyq nyq]*10^3);
ylabel('Arbitrary intensity'); ylim([0 5e4]);
```

קישורים:

[http://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICFIBERS/Diode laser spectra/I 58.55ND2B.csv](http://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICFIBERS/Diode%20laser%20spectra/I_58.55ND2B.csv)

[http://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICFIBERS/Diode laser spectra/I 51.30ND2B.csv](http://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICFIBERS/Diode%20laser%20spectra/I_51.30ND2B.csv)

[http://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICFIBERS/Diode laser spectra/I 49.88B.csv](http://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICFIBERS/Diode%20laser%20spectra/I_49.88B.csv)

שם הקובץ מעיד על הזרם (מילי-אמפר) אשר עבר בדיודה, כאשר ND2 מעיד כי הסיגנל הונחת  
ב2 סדרי גודל.