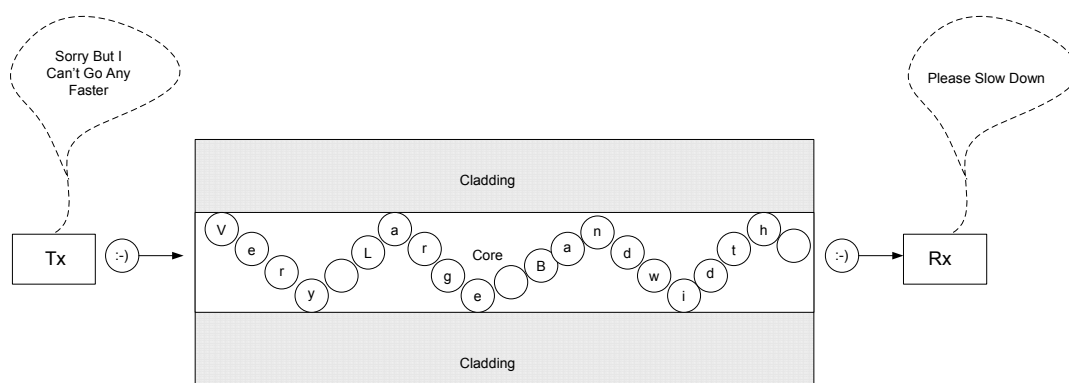




אוניברסיטת בן גוריון בנגב
המחלקה להנדסת אלקטרואופטיקה/מערכות תקשורת

המעבדה בתקשורת אופטית



גרסה 1.04 – 01/05/2012

הקדמה

החוברת "המעבדה בתקשורת אופטית" מכילה סדרה של ניסויים המהווים נדבך חשוב בבניית הידע הנדרש ממהנדסים ואנשי פיתוח העוסקים בתקשורת אופטית. החוברת חושפת את התלמיד למגוון רחב של ניסויים הן באופטיקה של סיבים והן באלקטרוניקה המיושמת בתקשורת אופטית.

החוברת מכילה תשעה תדריכים שונים אשר תוכננו בהסתמך על שלושה מקורות עקרים [1-3] ועורכי החוברת. כל תדריך מתחיל בהקדמה קצרה על נושא הניסוי ומטרתיו ולאחריה מובא בסיס הידע התיאורטי הדרוש להבנת הניסוי. ברקע התיאורטי ניתנים גם דגשים והערות מתוך העולם המעשי, כאשר במקרים מסוימים מורחב הדיון על אופן פתרון של הבעיות הן במעבדה והן בשטח. לאחר מכן מתואר הניסוי ואופן הבצוע שלו, כאשר מהלך הניסוי ניתן בנקודות ובשלבים עם איורים והסברים הממחישים את הבצוע. לבסוף, בכל תדריך מופיעות מספר שאלות הכנה מעשיות ותיאורטיות הנוגעות לניסוי ואשר ניתן לענות עליהן בנקל בעזרת הרקע הנצבר בתדריך. כמובן שמצורפת רשימת מקורות ספרות שבאמצעותה הקורא המתעניין יוכל להרחיב את הידע ולהתמקצע, אם כי כל הידע הנדרש לבצוע המעבדה מגולם בתדריכים.

המעבדה בתקשורת אופטית עוסקת בנושאים הבאים: עקרונות הולכת אור בסיבים אופטיים, מדידת מפתח נומרי, מדידת זווית קריטית, סוגי סיבים, מדידת השדה הרחוק במוצא הסיבים, מדידת פילוג אנרגיה זווית במוצא הסיב. מקורות אור במערכות תקשורת אופטית כגון LED ו-LD, שימוש בלייזר מדויק HeNe, בדרייברים של משדרים ובגלאים אופטיים, הספק מוצא של LED, הספק מוצא של לייזרים, רוחב סרט ואפנון LED, רוחב סרט ואפנון לייזר. מקלטים אופטיים, מדידת רגישות אופטית של מקלט ורוחב סרט, קצב העברת מידע מרבי בסיבים MMF, סיבי SMF ואופנים נמוכים, אלקטרוניקה של משדרים ומקלטים, מערכות WDM, מצמידים ומחברים אופטיים, Splices ועוד...

באופן עקרוני המעבדה מיועדת לפיסיקאים, למהנדסי אלקטרואופטיקה, מהנדסי מערכות תקשורת או מהנדסי אלקטרוניקה אשר צברו ידע מוקדם בתקשורת אופטית. קורסים כגון "תקשורת אופטית" או "יסודות תקשורת בסיבים אופטיים" (הניתנים באוניברסיטת בן גוריון בנגב) הם בבחינת ידע מוקדם חיוני לבצוע המעבדה.

אנו סבורים שהמעבדה בתקשורת אופטית מקנה את הפרקטיקה היסודית הדרושה מהמהנדס כדי להתקדם לפיתוח, תכנון וישום מערכות בתקשורת אופטית. נשמח לשמוע הערות לגבי התכנים ואו טעויות שנפלו בעת הכתיבה.

בהצלחה!

ערכו:

אבנר ספרני

עאטף שלאבנה

מקורות ספרות

1. Projects in Fiber Optics Application Handbook, Newport Corporation 2009.
2. Ariea Nahum, Experiments In Optical Communication, Scientific Educational Systems.
3. Govind P. Agrawal, Fiber Optic Communication System, Third Edition, John Wiley & Sons, 2002.
4. D. Kalish, et al., Fiber Characterization – Mechanical, Optical Fiber Communication, S. E. Miller and A. G. Chynoweth., Academic Press (New York) 1979, p.406.
5. D. L. Franzen and E. M. Kim, Inter laboratory measurement comparison to determine the radiation angle (NA) of graded index optical fibers, Applied Optics 20, p.1220 (1981).
6. D. Marcuse, Principle of Optical Fiber Measurements, Academic Press (New York) 1981, p. 226-236.
7. L. B. Jeunhomme, Single-Mode Fiber Optics, Principle and Applications, Marcel Oekker (New York) 1983, p.16.
8. D. Marcuse, Loss analysis of single-mode fiber splices, Bell Sys. Tech. J., vol. 56, pp. 703-718, 1977.
9. H. Kressel and J. K. Butler, Semiconductor Lasers and Hetrojunction LED's, Academic Press (New York), 1977.
10. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons (New York), 1969.
11. M. K. Barnoski, Fundamental of Optical Fiber Communications, 2nd Edition, M. K. Barnoski, ed., Academic Press (New York), 1981, p.158,177 and 334.
12. S, D, Personick, Fiber Optic, Technology and Applications, Plenum Press (New York), 1985, p.107.
13. Guide to WDM Technology Testing, EXFO (Quebec City, Canada), 2000, p.2, 21, 97.
14. S. V. Kartalopoulos, Introduction to DWDM Technology, IEEE Press (New York), 2000, p.4, 100, 114-116, 189.

תוכן העניינים

קווים מנחים לדו"ח מסכם.....	5
ניסוי 1 – הכרת מעגלים אלקטרוניים המשמשים בתקשורת.....	6
ניסוי 2 - אלקטרוניקה של משדרים ומקלטים בתקשורת אופטית ואפנון מידע.....	22
ניסוי 3 – שימוש בסיבים אופטיים מרובי אופנים (MMF) , מדידת NA ומדידת הנחתה.....	37
ניסוי 4 – סיב חד אופן SMF, צימוד לייזר לסיב חד אופן ומדידת פרופיל העצמה של האופן היסודי....	48
ניסוי 5 – אופנים מסדר נמוך (SMF).....	57
ניסוי 6 – אופיין זרם הספק וצימוד משדרי LD ו-LED לסיבים אופטיים.....	68
ניסוי 7 - חיבור סיבים אופטיים (Butt coupling, connectors & splices).....	80
ניסוי 8 - מפצלים בתקשורת אופטית.....	93
ניסוי 9 – מערכת תקשורת WDM.....	102

קווים מנחים לדו"ח מסכם

1. שער המכיל את שם הניסוי, לוגו של אוניברסיטת בן גוריון (תמונת שער אופיינית לניסוי זה אופציונאלי), שם המחלקה, תאריך ושם המבצעים למטה בצד ימין. (עמוד אחד).
2. תוכן עניינים, רשימת איורים וטבלאות.
3. הקדמה ומבוא שבהן מתואר הרעיון שבניסוי ומשמעותו, וכן רקע תיאורטי קצר. (לכל היותר עשרה עמודים).
4. רשימת רכיבים ואמצעים שנעשה בהם שימוש לבצוע הניסוי. (עמוד אחד).
5. מהלך הניסוי והצגת תוצאות – הסבר את הפעולות שבצעת ואם היו איזה שהם קשיים ואי הצלחות. הצג את תוצאותיך בצורה ברורה ונהל דיון עליהם בעת הצורך. (קצר וקולע, הינך מהנדס ולכן נהג בהתאם!).
6. מסקנות, סיכום ומקורות. (עמוד אחד).

הערות:

- הדוח בכללותו איננו יכול לחרוג מ-25 עמודים.
- אין להעתיק חוברת אל תוך הדו"ח.

ניסוי 1 – הכרת מעגלים אלקטרוניים המשמשים בתקשורת

מטרות הניסוי:

1. הכרת מתנד RC המבוסס על מגבר שרת
2. חישוב ומדידת אותות המתנד כפונקציה של קבוע הזמן.
3. ניתוח ומימוש מגבר משווה מסוג שמיט
4. תגובת משווה שמיט לכניסה הרמונית ולכניסה ריבועית
5. הכרת מגבר שמע, ומדידת הגבר מתח והגבר הספק
6. הכרת קדם מגבר, מדידת הגבר והענות לתדר (רוחב סרט)

1. רקע תיאורטי

1.1 מתנדים

אפנון, היא פעולה בסיסית במערכות תקשורת שבה משתמשים בהרמוניה בעלת תדר גבוה ביחס למידע כדי להעביר את סיגנל המידע. להרמוניה זו קוראים גל נושא, שע"י שינוי עוצמתה בצורה פרופורציונית למידע (אפנון AM) או ע"י שינוי התדר של הגל הנושא כפונקציה של המידע (אפנון FM) ניתן להעביר הסיגנל הרצוי.

כדי לייצר את הגל הנושא, קיים צורך באלקטרוניקה מתאימה. מתנד הוא מעגל אלקטרוני שמשמש ליצירת המעטפת של הגל הנושא בתדר ובעוצמה מתאימים. קיימות שיטות וטכנולוגיות רבות לבניית המתנד. תדר המוצא של מתנד ויציבותו הם מהמאפיינים החשובים ביצירת המתנד. בניסוי זה נכיר חלק מהמתנדים הבסיסיים לביצוע משימה זו.

1.1.1 מתנד RC מבוסס על מגבר שרת

מגבר שרת הוא מגבר רב דרגתי הנחשב כמגבר בעל תכונות אידיאליות למגוון רחב ביותר של יישומים. הביצועים של מגבר מתח באופן כללי נקבעים ע"י המאפיינים שלו כאשר ההגבר של המגבר, התנגדות הכניסה, התנגדות המוצא, ורוחב הסרט הם מהחשובים שביניהם. עבור מגבר מתח אידיאלי מתקיים:

$$R_{in} \rightarrow \infty - \text{התנגדות כניסה אינסופית, כך שהשפעת המגבר על מקור האות תהיה זניחה.}$$

$$R_{out} \rightarrow 0 - \text{התנגדות מוצא, שואפת לאפס כדי שהעומס לא ישפיע על מתח המוצא.}$$

$$A_v \rightarrow \infty - \text{הגבר המגבר בחוג פתוח גדול מאוד, זו תכונה חשובה לשימוש במשוב חיובי ושלילי.}$$

$BW \rightarrow \infty$ - רוחב סרט של המגבר. ההגבר בתחום רוחב הסרט בלתי תלוי בסוג האותות שאותם רוצים להגביר.

המגבר המעשי נבחר לפי התכונות החשובות לנו ביותר לפי המעגל הנבנה. לפעמים זה יכול להיות ההגבר ולפעמים זה יכול להיות רוחב הסרט או התנגדות הכניסה. התכונות של מגבר מעשי הם בערך התכונות הבאות:

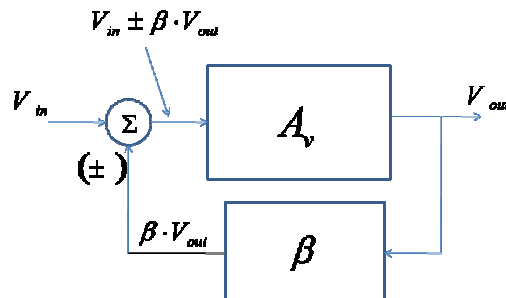
$$R_{in} \approx 10 M\Omega$$

$$R_{out} \approx 20 - 50 \Omega$$

$$A_v \approx 0.5 \times 10^6 - 1 \times 10^6$$

$$BW \approx 20 KHz - 100 KHz$$

בד"כ רוחב הסרט של המגבר מותאם לתחום התדרים של הסיגנלים שמעוניינים להגביר במערכת. משוב הוא מנגנון שבו חלק מאות המוצא מוחזר למגבר עם אות המבוא וזה מהווה מין בקרה מסויימת לאות המתקבל במוצא המערכת (ראה איור 1.1).



איור 1.1- סכימת מלבנים למגבר המחובר במשוב

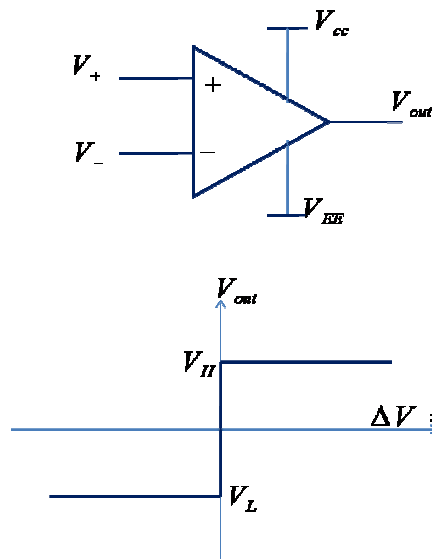
כאשר חלק המוצא שמוחזר למגבר מוחסר מהמבוא המשוב נקרא משוב חיובי וכאשר הוא מסוכם לכניסה המשוב נקרא משוב שלילי. ההגבר הכולל של המשוב יהיה (ראה איור 1.1):

$$A_f \equiv \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_v}{1 + \beta \cdot A_v} \quad \text{for negative feedback} \quad (1)$$

$$A_f \equiv \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_v}{1 - \beta \cdot A_v} \quad \text{for positive feedback}$$

כאשר A_f הוא ההגבר הכללי עם המשוב, β הגבר המשוב, ו- $D = 1 + \beta \cdot A_v$ היא מידת המשוב. משוב חיובי משפר בצורה משמעותית את ביצועי המגבר. הוא מגדיל את התנגדות הכניסה של המגבר פי D , מקטין את התנגדות המוצא פי D , ומגדיל את רוחב הסרט ע"י כך שהוא מגדיל את התדר העליון שאותו המגבר יכול להגביר ומקטין את התדר התחתון שאותו המגבר יכול להגביר. כאשר הגבר המגבר הוא אינסופי (כמו במקרה של מגבר שרת) ההגבר הכולל יהיה כאשר מחברים אותו במשוב שלילי $1/\beta$, דהיינו אינו תלוי בהגבר המגבר. זו הסיבה לכך שההגבר במגבר שרת שמחובר במשוב שלילי יהיה תלוי אך ורק ברשת המשוב. כאשר מגבר השרת מחובר במשוב חיובי ההגבר שלו יתבדר עוד יותר ואזי המוצא שלו יהיה תחום ע"י מתחי הרוויה של המגבר שנקבעים בד"כ ע"י מתחי הספק שניתנים למגבר. (ראה איור 1.2)

כאשר בונים מתנד, מתכננים את מגבר השרת לעבוד במשטר של משוב חיובי. מתח המוצא יתנדנד בין שתי רמות מתח דיסקרטיות $V_H \approx V_{cc}$ ו- $V_L \approx V_{EE}$, כאשר V_H ו- V_L הם מתחי הרוויה העליון והתחתון בהתאמה והם נקבעים ע"י V_{cc} ו- V_{EE} שהם מתחי הספק שמזינים את המגבר (ראה איור 1.2).



איור 1.2- סכימה להדקי מגבר שרת ואופייין מעבר בחוג פתוח

בגלל ההגבר הגבוה של המגבר במשטר של משוב חיובי, הפרש המתח בין שתי הכניסות של מגבר השרת יקבעו את מוצא המעגל. עבור הפרש מתח חיובי בין הכניסות יתקבל מתח גבוה במוצא ואילו עבור הפרש מתח שלילי יתקבל מתח מוצא נמוך.

1.1.2 מעגל RC :

כדי שנוכל לגרום למתח המוצא של המגבר להתנדנד, קיים צורך ברכיב שיגרום לשינוי מחזורי בכניסות המתח של מגבר השרת. לשם כך נשתמש בקבל שנטען ונפרק לחליפין באמצעות המוצא של המתנד דרך חיבור המשוב החיובי. מכיוון שהזרם בקבל הוא אפס במצב מתמיד (לאחר חלוף תופעות המעבר), ניתן למצוא את המתח על הקבל באמצעות פתרון משוואה דיפרנציאלית מסדר ראשון והפתרון יהיה:

$$v_c(t) = [V_0 - V_\infty] \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_0)}{\tau}\right) + V_\infty \quad (2)$$

כאשר:

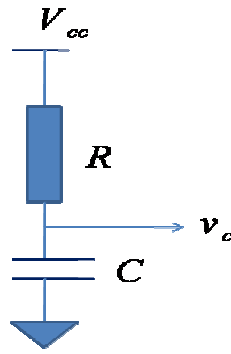
$v_c(t)$ - המתח על הקבל ברגע נתון t .

t_0 - הרגע בו אירע השינוי במעגל שגרם לשינוי במתח הקבל להתרחש.

V_0 - המתח על הקבל ברגע השינוי דהיינו ברגע $t = t_0$.

V_∞ - המתח על הקבל לאחר חלוף תופעות המעבר, והקבל הופך להיות נתק.

$\tau = R \cdot C$ - קבוע הזמן של המעגל שנקבע ע"י קיבול הקבל והנגד שדרכו הקבל מבצע את הטעינה או הפריקה. היחידות שלו הן שניות.



איור 1.3- מעגל RC טורי הנטען ממקור מתח DC

אם ניקח את המעגל המתואר באיור 1.3, בהנחה שברגע חיבור המעגל הקבל לא היה טעון (מתח אפס ברגע אפס) הקבל לאחר זמן ארוך יהפוך לנתק, המתח על הנגד יהיה אפס ואז המתח על הקבל יהיה שווה למתח המקור V_{cc} . לכן אם $V_{\infty} = V_{cc}$, $V_0 = 0$, $\tau = RC$, $t_0 = 0$ ניתן לתאר את המתח על הקבל כפונקציה של הזמן מרגע תחילת הטעינה:

$$v_c(t) = V_{cc} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right\} \quad (3)$$

תיאורטית הקבל צריך אינסוף זמן כדי להגיע למתח הסופי שלו (מתח הקבל), אבל מעשית ניתן לומר כי אחרי זמן סופי (בד"כ אחרי 5τ) הקבל מסיים את השינוי והופך להיות נתק. ניתן מהמתח על הקבל וע"י השימוש באופייין הקבל לחשב את הזרם שזורם דרכו:

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (4)$$

ניתן מהמשוואה האחרונה לראות כי המתח על הקבל חייב להיות רציף ואילו הזרם יכול לבצע קפיצות בערכו. מכיוון שהזרם הוא הנגזרת של המתח, עבור מתח לא רציף נקבל זרם אינסופי וזהו מצב לא פיסיקלי.

1.1.3 מתנד RC מבוסס על מגבר שרת

ניתן לנצל את אופייין המעבר של מגבר שרת בחוג פתוח כאשר הוא נמצא במשטר של רוויה לכל מתחי המבוא ולנצל את התכונה של קבל בטעינה ובפריקה רציפה על מנת לבנות מתנד, ובמוצא לקבל תנודה ספרתית. מתח המוצא של המעגל יתנדנד בין מתח הרוויה החיובי לבין מתח הרוויה השלילי תלוי במצב שבו נמצא הקבל ובערך הרגעי של מתח הקבל.

במעגל הנתון באיור 1.4, שני מצחי הספק שמהם ניזון המגבר הם $V_H = 12V$, $V_L = 0V$. מוצא המעגל שמתואר באיור 1.4 יכול להימצא בשני מצבים שונים. כאשר $V_{out} = V_H$, שני הנגדים R_{39} , R_{45} יהיו במקביל ומכיוון שאין זרם בכניסה למגבר השרת נקבל שהמתח בכניסה החיובית של מגבר השרת יהיה מחלק המתח על הנגד R כשהוא מחובר בטור לשקול של R_{39} , R_{45} , דהיינו:

$$V_+ = V_1 = \frac{V_H \cdot R}{R + R_{eq}}, \quad R_{eq} = \frac{R_{39} \cdot R_{45}}{R_{39} + R_{45}} \quad (5)$$

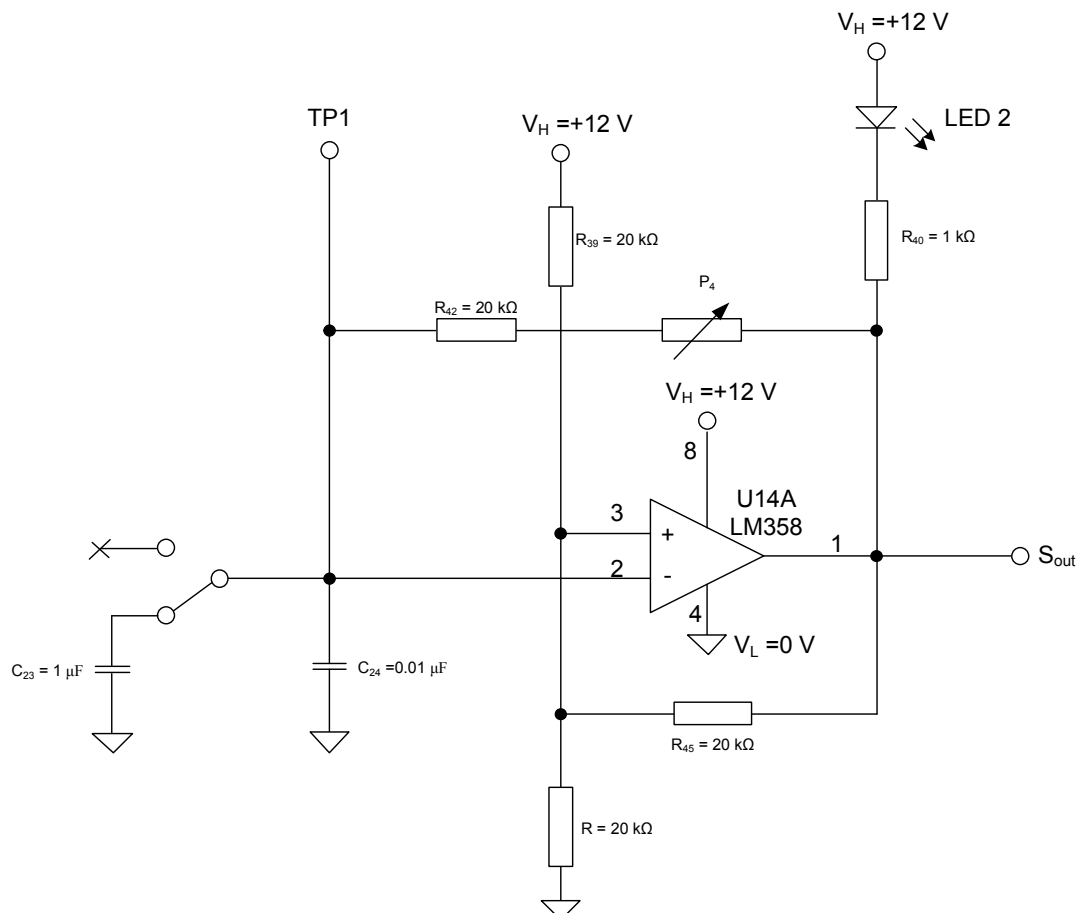
מכיוון שבמוצא המתח גבוה אזי המתח בכניסה השלילית של מגבר השרת נמוך מהמתח בכניסה החיובית שלו V_1 , והקבל יבצע טעינה דרך הנגד $R = R_{42} + P_4$ למתח המוצא הגבוה V_H . כאשר מתח הקבל יגיע לערך המתח בכניסה החיובית V_1 , המצב ההדדי של כניסות מגבר השרת יתהפך. ז"א כעת המתח בכניסה השלילית של מגבר שרת גבוה מזה שבכניסה החיובית ולכן במוצא המגבר המתח יהיה מתח הרוויה הנמוך $V_L = 0$. הנגדים R_{45} , R עכשיו יהיו במקביל ביניהם והמתח בכניסה החיובית יהיה מחלק המתח בין המקביל שלהם לבין הנגד

R_{39} , דהיינו:

$$V_+ = V_2 = \frac{V_H \cdot R_{eq}}{R_{39} + R_{eq}}, \quad R_{eq} = \frac{R_{45} \cdot R}{R_{45} + R} \quad (6)$$

בשלב זה הקבל יתחיל להתפרק דרך אותו מסלול בגלל שמתח המקור בשבילו הפך להיות $V_L = 0$. כאשר הקבל מבצע טעינה, המאפיינים של טעינה זו, כדי לחשב את המתח הרגעי שלו בטעינה, הם:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_2 \\ V_\infty &= V_H \\ \tau &= RC \\ t_0 &= t_0 \end{aligned}$$



איור 1.4- מעגל אלקטרוני של המתנד RC

כדי לחשב את פרק הזמן שבו הקבל נמצא בטעינה צריך לחשב הרגע שבו הקבל מגיע למתח V_1 כפי שאמרנו:

$$v_c(t) = [V_2 - V_H] \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau}\right) + V_H \quad (7)$$

נחשב מתי מתח הקבל שווה ל- V_1 :

$$\begin{aligned} V_1 &= [V_2 - V_H] \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau}\right) + V_H \\ T_{ch} \equiv t - t_0 &= -\tau \cdot \ln\left[\frac{V_H - V_1}{V_H - V_2}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

נסמן בפרק הזמן מרגע תחילת הטעינה עד להפסקתה ב- $t - t_0 \equiv T_{ch}$ כאשר (ch-charge). כאשר הקבל מגיע לערך זה (V_1), מתח המוצא והמתח בכנסה החיובית של המגבר משתנים ל- $V_+ = V_2$, $V_{out} = V_L$, כעת הקבל יתחיל להתפרק מהערך שלו (V_1) עד שמגיע בחזרה ל- V_2 , משם התהליך מתחיל כולו מחדש בצורה מחזורית. פרק הזמן הדרוש לקבל כדי להתפרק מערכו ב- V_1 ל- V_2 נקבע ממשוואת הדפקים שמתארת את מתחו הרגעי לפי הנתונים הבאים:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_1 \\ V_\infty &= V_L \\ \tau &= RC \\ t_0^* &= t_0 + T_{ch} \end{aligned}$$

יש לשים לב לרגע השינוי החדש שהוא למעשה הרגע שהגענו אליו בתהליך הקודם של טעינה.

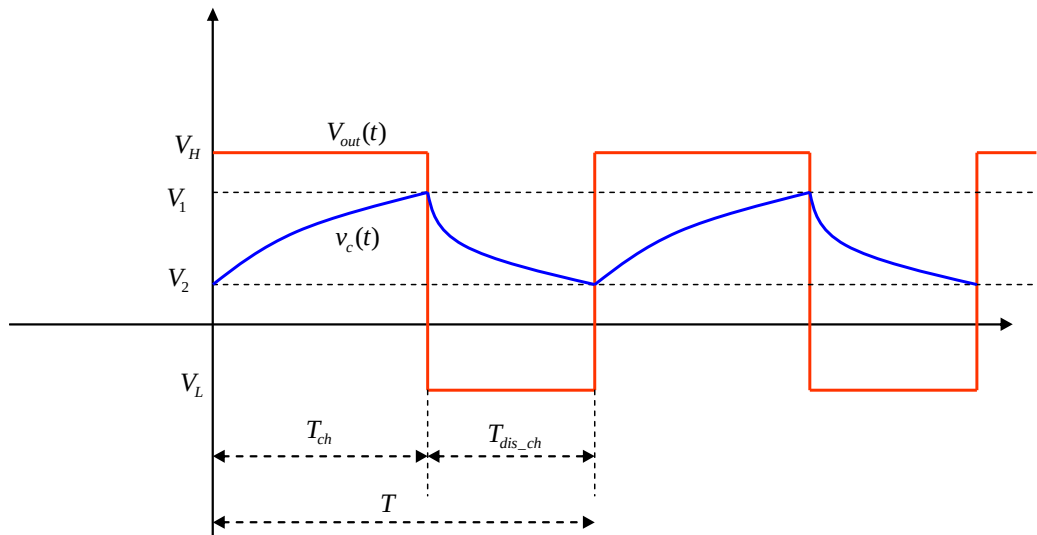
$$\begin{aligned} v_c(t) &= [V_1 - V_L] \exp\left(-\frac{(t-t_0^*)}{\tau}\right) + V_L \\ v_c(t) &= V_2 \end{aligned} \quad (9)$$

כדי לחשב את פרק הזמן שהוא פרק הזמן $t - t_0^*$ שאחריו מתח הקבל מגיע ל- V_2 .

$$\begin{aligned} V_2 &= [V_1 - V_L] \exp\left(-\frac{(t-t_0^*)}{\tau}\right) + V_L \\ T_{dis_ch} \equiv t - t_0^* &= -\tau \cdot \ln\left[\frac{V_2 - V_L}{V_1 - V_L}\right] \end{aligned} \quad (10)$$

כאשר T_{dis_ch} (dis_ch-discharge) הוא פרק זמן הפריקה.

לכן לסיכום, מתח המוצא יהיה ריבועי שמתנדנד בין שני ערכים. בערך הגבוה שלו יהיה במשך T_{ch} מסה"כ זמן המחזור ובערך הנמוך יהיה לפרק זמן T_{dis_ch} מסה"כ זמן מחזור ששווה $T = T_{ch} + T_{dis_ch}$. ניתן ממשוואות (8) ו- (10) לראות כי תדר התנודות נקבע ע"י ערכי הנגדים במעגל ורמות המתח שניזון מהם המתנד (ראה איור 1.5).

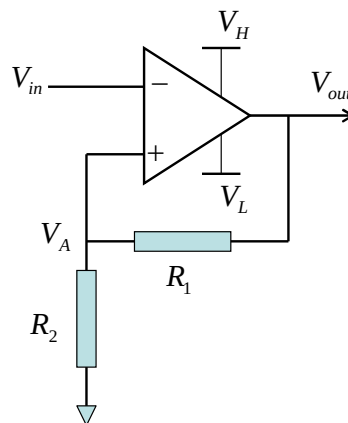


איור 1.5- תיאור איכותי לאות המוצא והמתח על הקבל במתנד RC מבוסס על מגבר שרת

1.1.4 משוואה מסוג שמיט (Schmitt trigger)

משוואה, הוא מעגל בסיסי שמשמש בד"כ למטרות גילוי במעגלי תקשורת אנלוגית וספרתית. קיימים שני סוגי משוואים בסיסיים, משוואה בחוג פתוח ומשוואה שמיט. משוואה בחוג פתוח מתבסס על התכונה של מגבר שרת בחוג פתוח שנזכרה לעיל שבה המגבר מגיב להפרש בין כניסותיו בצורה ישירה בכך שהוא מפיק רוויה חיובית/שלילית במוצאו בהתאם למצב ההדדי בין שתי הכניסות. בניסוי נתמקד בסוג השני שהוא משוואה שמיט שעיקר פעולתו מבוסס על תגובת מגבר שרת בחוג סגור כאשר סוג המשוב הוא משוב חיובי.

משוואה שמיט מיועד להבחין בין אם סיגנל הכניסה עולה או יורד, בהתאם למגמת הכניסה הוא מייצר מתח סף שונה וקבוע וע"י כך נמנעת תגובה מהירה לרעשים לא רצויים, דבר שסובל ממנו משוואה בסיסי. יתרון אחר למשוואה שמיט הוא זמן התגובה הקצר יחסית לזה של משוואה בסיסי, וזה בגלל המשוב החיובי שמגביר את תגובת המעגל לשינויים ומקטין את זמני ההשהיה. במעגל המתואר באיור 6, ניתן לראות כי כאשר הכניסה עולה ומתקרבת למתח בכניסה החיובית של מגבר השרת V_+ מתחיל המשוואה להגיב לקרבה זו במוצא ומתח המוצא מתחיל לרדת לערך נמוך. בגלל שהמתח V_+ קשור למתח המוצא דרך מחלק המתח הוא יורד גם כן ואז ההפרש היחסי בינו לבין הכניסה גדל וזה מחזק עוד יותר השינוי במוצא. באופן דומה זה קורה כאשר הכניסה יורדת. לכן המשוב החיובי מזרז את המעברים במוצא המשוואה.



איור 1.6- מעגל עקרוני למימוש משוואה שמיט

כאשר המתח במבוא קטן ממתח בכניסה החיובית ($V_{in} < V_A$) המוצא יהיה גבוה. במקרה זה אם הכניסה יורדת, לא ישתנה כלום במוצא המעגל וגם לא בכניסה החיובית שהיא פרופורציונית למתח המוצא.

למתח הזה נקרא מתח הסף הראשון שהוא למעשה קובע למגבר את מתח המבוא $\left(V_{T1} = V_A = \frac{V_H \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right)$

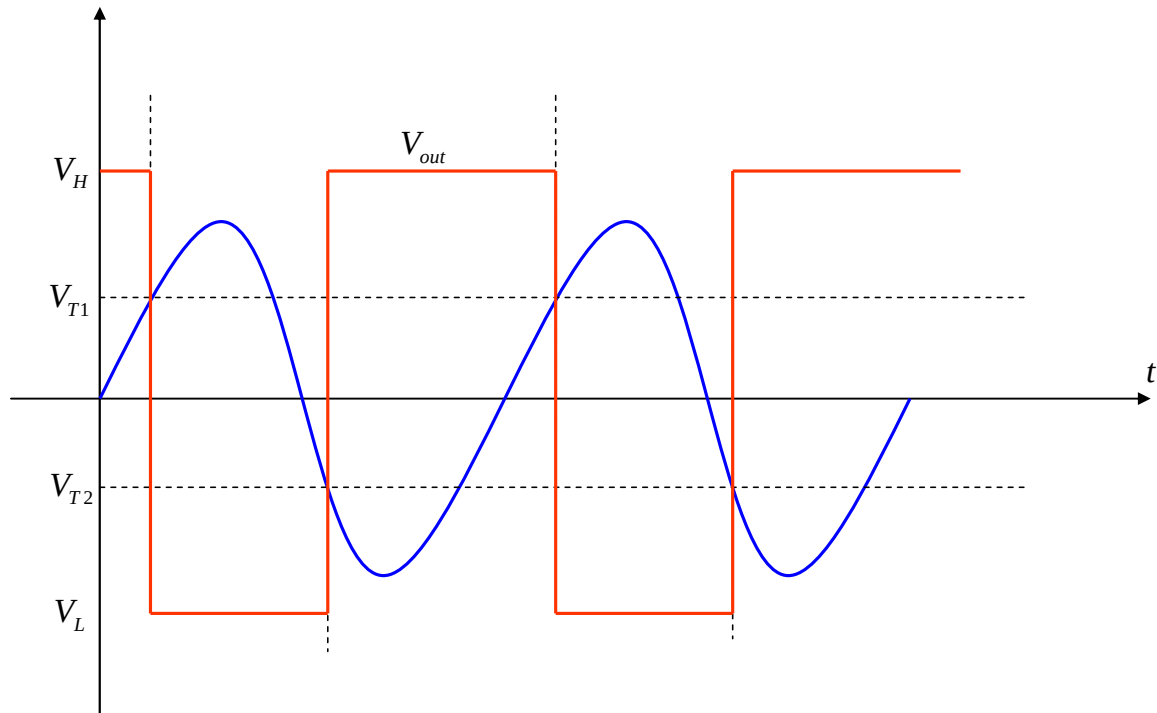
שעבורו ישתנה המוצא. כאשר במצב זה מתח הכניסה מתחיל לעלות, המשווה משנה מצב מגבוה לנמוך כאשר מתח הכניסה מגיע ל (V_{T1}).

עכשיו במוצא יהיה לנו מתח נמוך, והמתח בכניסה החיובית משתנה ומקבלים מתח סף חדש שיקבע השינוי הבא

של המשווה, $\left(V_{T2} = V_A = \frac{V_L \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right)$ למתח זה נקרא מתח סף שני.

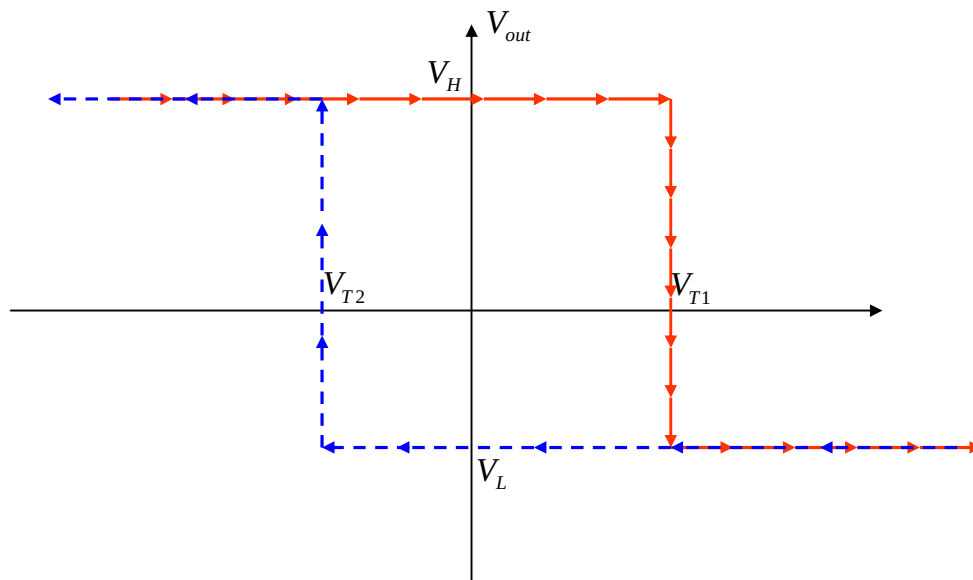
אם הכניסה תמשיך לעלות, לא ישתנו המתחים שנתקבלו, אבל אם הפעם הכניסה תתחיל לרדת המשווה יחליף מצב כאשר היא מגיעה בירידתה לערך מתח הסף השני (איור 1.7).

אם נצייר את אופיין המעבר של המשווה (איור 1.8), ניתן להבחין בשני מצבים שונים. הראשון הוא תגובת המוצא כאשר מתח המבוא עולה, והשני הוא תגובת המוצא כאשר מתח המבוא יורד והם אינם זהים. לכן מתקבל עקום חשל באופיין שמגדיר את החסינות לרעש של המשווה, שהיא ההפרש בין שני מתחי הסף ($V_{T1} - V_{T2}$).



איור 1.7- תיאור איכותי למתח המבוא ומתח המוצא של משווה שמיט

שים לב באיור 1.7 לרגע שבו מתרחש השינוי במתח המוצא. כאשר הכניסה עולה, השינוי מתרחש ב- (V_{T1}) שהוא מתח הסף בעלייה. כאשר הכניסה יורדת, השינוי מתבצע ב- (V_{T2}) שהוא מתח הסף בירידה.



איור 1.8 – עקומת חשל במגבר שמיט

באיור 1.8, מופיע אופיין המעבר של המשווה. כאשר הכניסה עולה מתח המוצא נמצא במצב גבוה ומתח הסף הוא (V_{T1}) , ז"א כאשר המבוא מגיע אליו המשווה מחליף מצב. כאשר הכניסה יורדת מתח המוצא נמצא במצב נמוך ומתח הסף הוא (V_{T2}) , ז"א כאשר המבוא מגיע אליו המשווה מחליף מצב.

1.2 קדם מגבר ומיקרופון

כשאומרים קדם מגבר, אנו מתכוונים למגבר שתפקידו להגביר אותות נמוכים מאוד. כדי שנוכל לעבד את הסיגנלים החלשים יחסית שמתקבלים במוצאו. המוצא של קדם מגבר זה משמש בדרך כלל כאות מבוא למגבר הספק.

בדרך כלל, קדם מגבר הוא מגבר מתח. מכיוון שהעומס שלו הוא מגבר אחר, שעכבת המבוא שלו גבוהה, לא נדרש קדם המגבר לספק זרם גבוה והספק גבוה. המטרה היא לקבל אות מתח במוצאו עם משרעת גבוהה. לההתנסות עם קדם מגבר משתמשים במגבר מונוליטי LM386, שהוא מעגל משולב שעליו נרחיב בפרק הבא.

1.3 מגבר שמע ורמקול

מגברי הספק הם בדרך כלל הדרגה האחרונה במגבר רב דרגתי. הם מופעלים ומקבלים את מתח המבוא שלהם מהדרגות שלפניהם. הדרגות הקודמות מגבירות, בדרך כלל, את תנודת המתח של האות. מגבר ההספק נדרש לספק תנודת מתח ותנודת זרם גבוהים לעומס בעל התנגדות נמוכה. למימוש פעולת ההגברה נשתמש במעגל משולב LM386.

פעולת ההגברה נעשית בעיקר ע"י טרנזיסטור ביפולרי (דו-קוטבי) שנמצא בתוך המעגל המשולב, והמאפיינים של מגבר ההספק נקבעים ע"י הביצועים של הטרנזיסטור. (ראה איור 1.9)

הטרנזיסטור יכול להמצא בשלושה מצבי עבודה:

- מצב קטעון: $I_B = I_C = I_E = 0$, $V_{BE} < V_{BE(on)}$, מצב זה נוצר עקב קטעון בצומת בסיס-

פולט של הטרנזיסטור. במצב זה הטרנזיסטור לא יכול להזרים זרם.

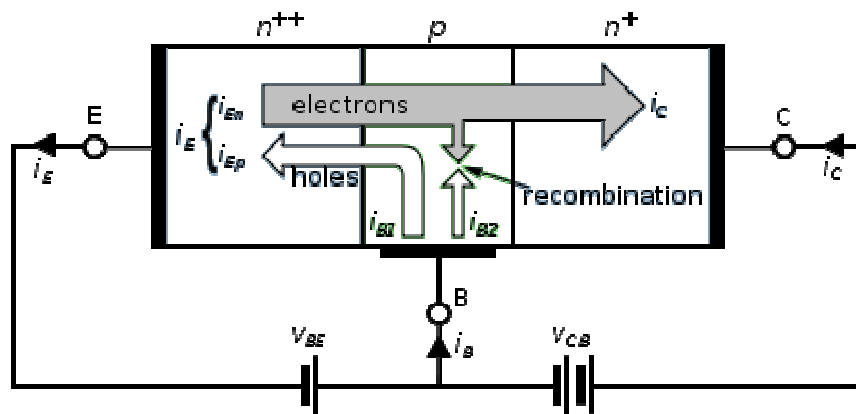
- מצב פעיל: $V_{BE} = V_{BE_on}$, $I_C = \beta I_B$, $I_E = I_B + I_C$, הטרנזיסטור מגביר בצורה ליניארית את זרם הבסיס. במצב זה מתח הצומת קולט-בסיס הוא חיובי $V_{CB} > 0$.

- מצב רוויה: $V_{BE} = V_{BE_on}$, $I_C < \beta I_B$, $I_E = I_B + I_C$, הקשר הליניארי בין זרם הבסיס לזרם הקולט לא מתקיים והמתח בצומת קולט-בסיס הוא שלילי $V_{CB} < 0$.

β - היא הגבר הזרם של הטרנזיסטור, הוא נקבע לפי הרוחב של בסיס הטרנזיסטור וריכוז נושאי המטען שבו. ניתן לראות מאיור 1.9, כי אלקטרונים שנסחפים מהפולט של הטרנזיסטור חלק מהם מתאחד עם החורים באזור הבסיס והחלק האחר שמצליח לשרוד עובר לאזור הקולט שם הוא מהווה את עיקר הזרם בקולט הטרנזיסטור. אם נסמן ב- α את חלק הזרם שמגיע מהפולט של הטרנזיסטור, כאשר $0 \leq \alpha \leq 1$ מתקיים כי:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (11)$$

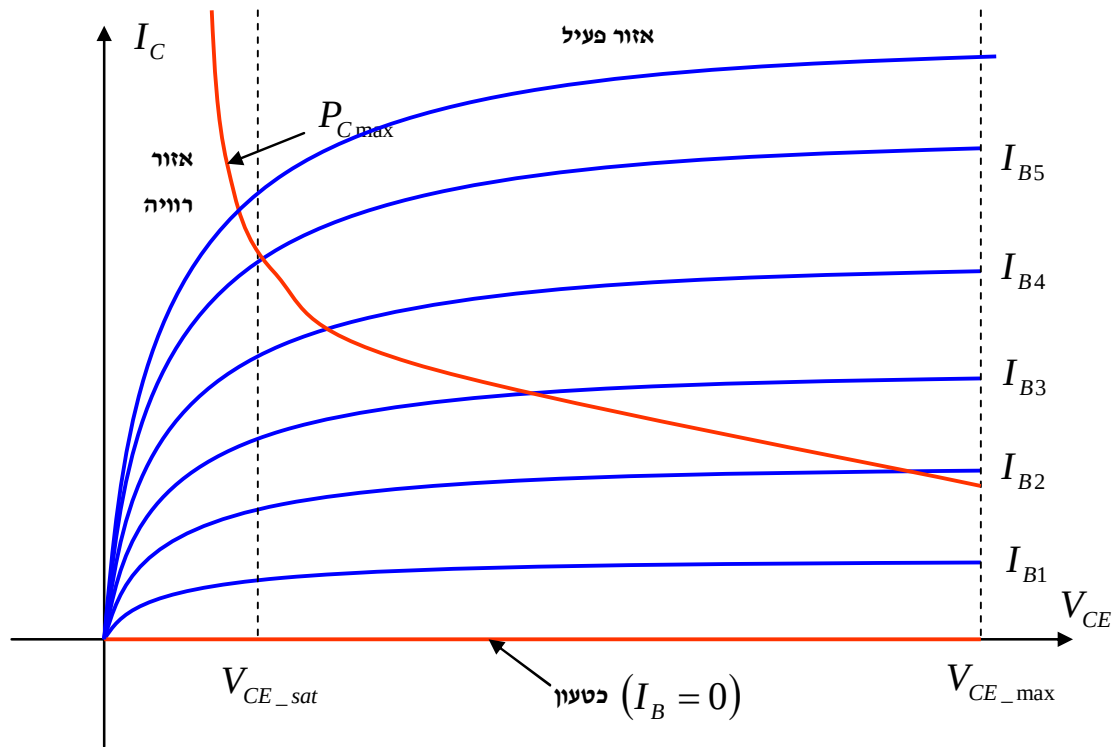
ככל שהפרמטר α יהיה קרוב יותר לאחד נקבל הגבר זרם גדול יותר.



איור 1.9 – טרנזיסטור ביפולרי

התגובה החשמלית של הטרנזיסטור מסתכמת באופיין שלו שמתאר את הקשר המתמטי-גרפי של זרם הקולט I_C לבין מתח הצומת קולט-פולט V_{CE} , נקודת העבודה של הטרנזיסטור ברגע נתון היא נקודה שנופלת על האופיין ומתארת את המצב החשמלי שבו נמצא הטרנזיסטור. כאשר הטרנזיסטור משולב במעגל חשמלי, נקודת העבודה של הטרנזיסטור על האופיין חייבת להתלכד עם האופיין החשמלי של המעגל הספציפי כדי שיהיה פתרון מתמטי למצב העבודה של הטר' (טרנזיסטור). פתרון מתמטי מצביע על מצב פיסיקלי חשמלי שבו יכול להימצא הטר'.

הקו שמתאר את עקומת ההספק המכסימלי המותר בטר' קובע את נקודת העבודה שבה יכול להיות הטר' ולפזר הספק מרבי בלי לפגוע בו. למעשה נקודת העבודה נקבעת לפי נקודת החיתוך בין העקום שמתאר את אופיין הטרנזיסטור לבין העקום שמתאר את ההספק המכסימלי שהטר' יכול לפזר (איור 1.10). בד"כ רצוי שנקודת העבודה של הטרנזיסטור תהיה במרכז האופיין כך שמתאפשרת תנופת מתח מרבית ללא עיוותים. את מגברי ההספק ניתן למיין בהתאם לנקודת העבודה שלהם:



איור 1.10 – אופיין זרם מתח של טרנזיסטור ביפולרי, ועקומת פיזור ההספק המרבי

מגבר CLASS A במגברים מסוג זה נמצאת נקודת העבודה במרכז קו העבודה, ובכך מתאפשרת תנופה מרבית למוצא ללא עיוותים.

מגבר CLASS B במצב זה נמצאת נקודת העבודה באזור הקיטעון של הטרנזיסטור.

מגבר CLASS AB במגברים מסוג זה נמצאת נקודת העבודה של המגבר בנקודה של סף ההולכה בקו העבודה.

חלק מההספק שמועבר לטרנזיסטור מספק הכוח מתפזר על הטרנזיסטורים. היחס בין ההספק המועבר אל העומס לבין ההספק המסופק ע"י ספק הכוח מגדיר את הנצילות של הטרנזיסטור.

$$\eta = \frac{P_{LOAD}}{P_{source}}$$

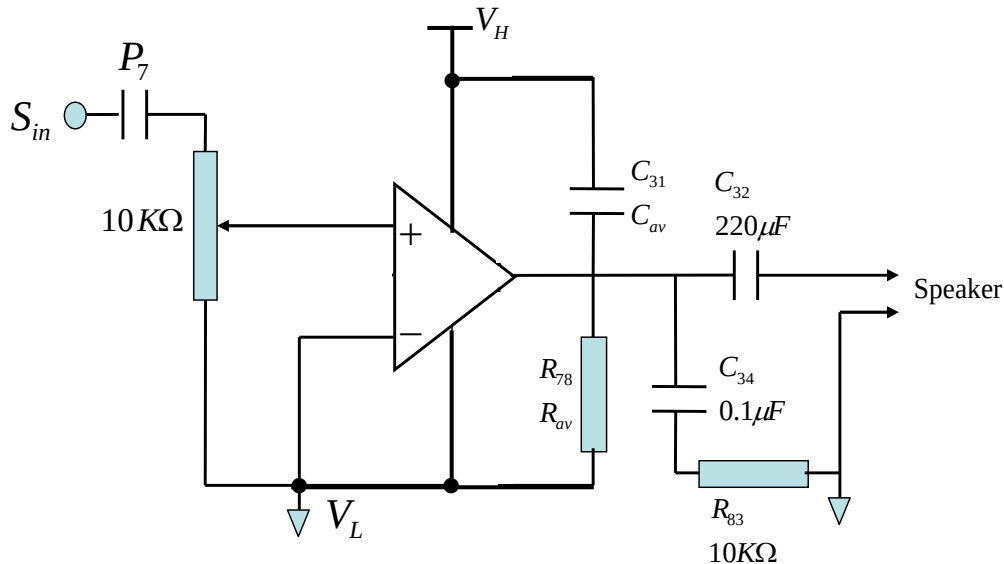
כדי למדוד את הגבר ההספק של הטר', אנו מספקים מתח סינוסי בכניסתו ומודדים את עוצמת מתח החילופין במוצאו. מתח החילופין במוצא נופל על הרמקול. ניתן להחליפו בנגד הספק כדי למנוע את השפעת הרמקול על מדידת ההספק.

$$P_L = \frac{V_o^2}{R_L} \quad \text{הספק המוצא של המגבר הוא:}$$

$$P_L = \frac{V_{in}^2}{R_{in}} \quad \text{הספק הכניסה למגבר הוא:}$$

$$A_p \equiv \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{V_o^2}{V_{in}^2} \cdot \frac{R_{in}}{R_L} \quad \text{הגבר ההספק המתקבל יהיה:}$$

המתחים המופיעים בנוסחאות הם מתחים אפקטיביים, ניתן גם להשתמש בערכי Peak to peak. כדי למדוד עקום היענות אנו מספקים כניסה הרמונית עם תדר משתנה, ובמוצא מודדים את התדר של מחצית ההספק, זה יהיה תדר החסימה של המגבר והוא יגדיר את רוחב הסרט. כדי לממש את המעגל משתמשים במעגל משולב מסוג LM386 שנמצא בתוך הערכה TPS-3481, המגבר הנתון ניזון מספק כוח יחיד (איור 1.11).



איור 1.11 – מעגל הניסוי של מגבר הספק

התנגדות הכניסה של המגבר היא למעשה ההתנגדות בין שתי הכניסות של מגבר השרת. הקבלים שמופיעים בכניסה וביציאה למגבר תפקידם הוא סינון ערכי ה-DC שמתווספים לכניסה ויציאה מתח המוצא ואין להם תפקיד בהגבר של המעגל.

2. שאלות הכנה:

1. הראה כי הגבר משוב שלילי תלוי אך ורק ברשת המשוב כאשר $A_v \rightarrow \infty$.
2. מגבר שהגברו 10 בחוג פתוח ובעל התנגדות מבוא $100K\Omega$, התנגדות מוצא 100Ω , מעביר פס בתחום $10KHz \div 50KHz$. מחובר במשוב שלילי דרך רשת משוב אידיאלית בעלת $\beta = 0.1$. חשב את הגבר המשוב, התנגדות הכניסה, התנגדות היציאה ורוחב הסרט של המשוב.
3. הראה ע"י משוואה 2, אם הקבל צריך לבצע שינוי מ-0 ל- V_{cc} , מהו האחוז מסה"כ שינוי הוא מספיק לבצע במשך 5τ .
4. מתנד RC המבוסס על מגבר שרת כפי שמופיע באיור 1.4 ניזון מספק כוח כפול $V_H = +15V$, $V_L = -15V$. הרכיבים שנלקחו לתכנון המתנד הם: $R_{39} = R_{45} = R = R_{40} = 1K\Omega$, $R_{42} = 51K\Omega$, $C_T = C_1 + C_2 = 1nF$, $P_4 = 0$. חשב את

תדר התנודות ואת מחזור הפעולה של המתנד T_{ch}/T עבור המתנד הנתון. צייר באופן איכותי את המוצא, המתח על הקבל, והמתח בכניסה החיובית של מגבר השרת.

5. במבוא משווה שמיט (איור 6) מספקים כניסה סינסיאדלית בתדר (100 KHz), אמפליטודה 10 וולט. המשווה ניזון מספק כוח כפול סימטרי ($V_H = -V_L = 12V$) הנגדים שמהווים רשת המשוב שווים ($R_1 = R_2$). חשב מתחי הסף של המשווה, צייר אופיין מעבר, צייר מתח המבוא ומתח המוצא על אותה מערכת צירים, חשב מחזור הפעולה של המוצא Duty cycle.

6. במעגל הנתון באיור 11, הנח כי התנגדות הכניסה של המגבר היא R_{in} , כמו כן הנח שמסופק מתח סינוסי עם אמפליטודה (S_{in-max}). מהי אמפליטודת מתח המבוא בכניסה למגבר כאשר זחלן הפוטנציומטר נמצא באמצע? בטא תשובתך באמצעות נתוני השאלה.

7. עבור אותו מעגל שבשאלה הקודמת, הנח כי התנגדות הרמקול היא R_{sp} ונמדד על הנגד מתח בעל אמפליטודה V_{out} , מהו ההספק שנמסר לרמקול במקרה זה?

8. על סמך התוצאה של שאלה 6 ו-7 בטא את הגבר ההספק של המעגל?

9. מהן היתרונות של משווה שמיט לעומת משווה בסיסי.

3. מהלך הניסוי וציוד נדרש

3.1 מתנד RC

הציוד הנדרש:

TPS-3481	-1
ספק כוח	-2
מחולל אותות	-3
סקופ	-4
חוטי גישור	-5

מהלך הניסוי

1. חבר את הערכה TPS-3481 אל ספק הכוח, חבר את ספק הכוח את מתח הרשת, והפעל את המתג הראשי בערכה.

2. זהה את המעגל RC- Oscillator בערכה, העבר את המפסק (CL/CH) Cap. low/Cap. high למצב נמוך CL. ה-LED שליד המתנד צריך להבהב בתדירות הנראית לעין (תדירות נמוכה).

3. שנה את מצב הפוטנציומטר שבמתנד והתבונן בתדירות ה-LED.

4. חבר בחון CH1 של הסקופ ליציאת המתנד S_{out} . חבר את בחון הסקופ CH2 לנקודה TP1 שמראה את מתח הקבל וצייר את המתחים שקיבלת.
5. העבר את מצב המפסק CL\CH למצב CH (תדירות גבוהה) וצייר האותו שמתקבלות על הסקופ. ציין את V_1 ו- V_2 על העקומות, מהו לפיכך המתח בהדק החיובי של המגבר?
6. מדוד את הערכים המכסימליים של שני האותות שמתקבלים על הסקופ. השווה עם התיאוריה.
7. מדוד את התדר של הסיגנל שמתקבל ואת מחזור הפעולה Duty cycle. בצע רשום מדויק.
8. שנה את הפוטנציומטר למצב שבו תקבל תדירות מכסימלית ומינימאלית. במצב של תדירות מכסימלית התנגדות הפוטנציומטר היא אפס, התנגדות הנגד הטורי היא 20 קילואוהם. ערך הקבל עומד על $C = 0.01\mu F$. השווה בין הערך המדוד של התדר המרבי והערך המחושב (מהמוצא של המתנד). מהמידה במצב של תדירות מינימאלית הערך את ערך ההתנגדות של הפוטנציומטר.
- בדו"ח המסכם: הצג האותות שהתקבלו בכל מדידה בצורה איכותית, מתוך מדידות התדר במצב CH הערך את קבוע הזמן והשווה עם התיאוריה.

3.2 משווה שמיט:

הציוד הנדרש הוא אותו ציוד מהניסוי הקודם (מעגל מתנד RC)

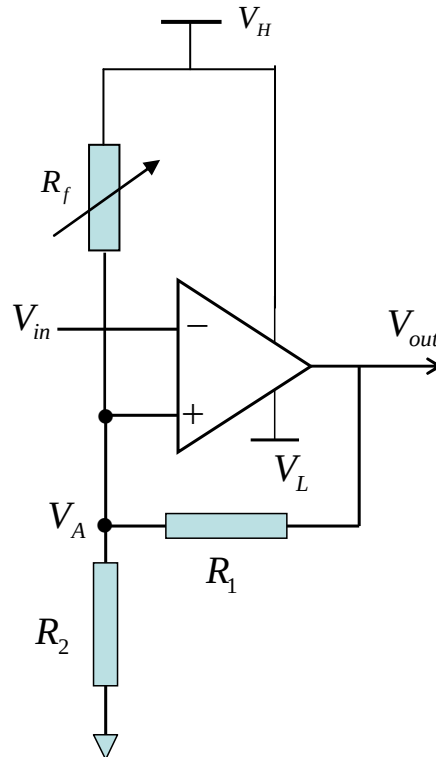
מהלך הניסוי:

1. חבר את הערכה לספק הכוח, חבר את הספק לרשת, הפעל את המתג הראשי בערכה. המעגל שמממש משווה שמיט בערכה מתואר באיור 1.12 בסוף סעיף זה.
2. יצר ממחולל האותות סיגנל סינוסי בתדר $1KHz$ בעל אמפליטודה 6 וולט (בדוק בסקופ את האות), חבר אותו לכניסת המשווה. הערכים של הנגדים במעגל הם $R_1 = 1M\Omega$, $R_2 = 20 K\Omega$, $R_f = 100 K\Omega$, לכן מתחי הסף שיתקבלו יהיו קרובים אחד לשני והם לא יהיו סימטריים (מרכז עקומת החשל לא יהיה באפס). כוון את ערך הנגד המשתנה כך שמרכז עקומת החשל יהיה בסביבת 6 וולט, ובחר את מתח הכניסה ממחולל האותות כך שיכיל ערך DC המתאים למתח זה.
3. חבר את בחון הסקופ CH1 למוצא המחולל, וחבר את הבחון השני ליציאת המתנד והתבונן באותות שקיבלת.
4. שרטט את צורת האותות שקיבלת תוך הדגשת מתחי הסף של המשווה.
5. שנה את תדירות אות המבוא והתבונן במוצא, באיזה תדר מתעוות המוצא של המתנד.
6. שנה את המבוא לגל ריבועי בתדר $1KHz$, שרטט את האותות שמתקבלות על הסקופ.

7. העלה את תדירות הכניסה עד שתוכל להבחין בזמני ההשהיה של אות המוצא.

8. חזר את אות המבוא לגל סינוסי בתדר 1KHz והעבר את הסקופ למצב XY, שרטט את האות שמתקבל על הסקופ. צריך לכוון את הסקאלה של המתח לערכים מתאימים על מנת שתוכלו להבחין במתחי הסף של המשווה.

לדו"ח המסכם: צייר האותות שהתקבלו, מדוד את מתחי הסף, מדוד זמני ההשהיה של המתנד t_{PLH} , t_{PHL} , צייר את עקומת החשל של המתנד וחשב חסינות המשווה לרעש.



איור 1.12 – מעגל הניסוי של משווה שמיט

3.3 קדם מגבר ומיקרופון (הציוד של הניסוי הקודם)

מהלך הניסוי:

1. חבר את הערכה לספק הכוח, חבר את הספק לרשת, הפעל את המתג הראשי בערכה.
2. יצר ממחולל האותות סיגנל סינוסי בתדר 1KHz בעל אמפליטודה 0.5 וולט, חבר אותו לכניסת המגבר.
3. חבר את בחון הסקופ CH1 לכניסת המגבר S_{in} , וחבר את הבחון השני ליציאת המגבר והתבונן באותות שקיבלת.
4. שנה את עוצמת הכניסה מבלי לקבל עיוותים במוצא ומדוד את הגבר המתח.

5. החזר את עוצמת הכניסה לערך ההתחלתי, הגדל את תדר הכניסה עד למדידת תדר מחצית ההספק של המגבר. (כלומר עד לנקודה שבה מתח המוצא קטן פי $\sqrt{2}$, דהיינו עד לנקודה שבה הגבר המתח קטן פי $\sqrt{2}$). דווח על רוחב הסרט של הקדם מגבר.

לדו"ח המסכם: צייר אופיין המעבר של המגבר תוך ציון האזור הליניארי של המגבר (V_{out} vs. V_{in}), ציין את הגבר המגבר, מדוד תדר מחצית ההספק של המגבר (רוחב סרט).

3.4 מגבר שמע ורמקול (הציוד הנדרש אותו ציוד כמו בניסוי הקודם)

מהלך הניסוי:

1. חבר את הערכה לספק הכוח, חבר את הספק לרשת, הפעל את המתג הראשי בערכה.
2. יצר ממחולל האותות סיגנל סינוסי בתדר 1KHz בעל אמפליטודה 1 וולט, חבר אותו לכניסת מגבר השמע. חבר את בחון הסקופ CH1 לכניסת מגבר השמע, הינך צריך לשמוע צפצוף ברמקול.
3. שנה את עוצמת המבוא והאזן לצפצוף שמתקבל ברמקול.
4. כוון את עוצמת המבוא ל- 0.5 וולט שיא לשיא. חבר את בחון הסקופ CH2 לנקודה TP7 מדוד את המתח על הרמקול, הנח כי התנגדות הרמקול היא $10\text{K}\Omega$. חשב את ההספק המתפזר על הרמקול.
5. מדוד וחשב את המתח האפקטיבי המופיע בכניסת המגבר. ע"י מדידת המתח בנקודה TP5, הנח כי התנגדות המבוא של המגבר היא $100\text{K}\Omega$, חשב את הגבר ההספק בכניסה למגבר. (כוון את הנגד משתנה לערך מרבי $10\text{K}\Omega$).
6. כוון את עוצמת המבוא ל- 0.5 וולט שיא לשיא. שנה את תדירות המבוא עד קבלת תדר מחצית ההספק של המגבר.

לדו"ח המסכם: צייר האותות שמתקבלים מהמגבר, חשב את הגבר המתח, חשב רוחב הסרט של המגבר.

ניסוי 2 - אלקטרוניקה של משדרים ומקלטים בתקשורת אופטית ואפנון מידע

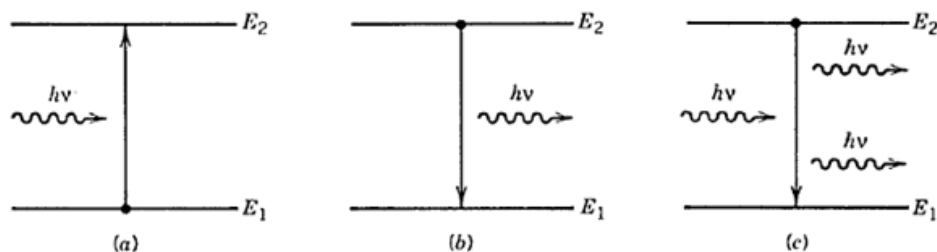
מטרות הניסוי:

1. הכרת דיודה פולטת אור LED
2. הפעלת LED כמשדר אופטי
3. הכרת פוטורנזיסטור (phototransistor)
4. רגישות מקלט אופטי
5. בדיקת ליניאריות של מערכות השידור והקליטה
6. שידור וקליטה של אותות אנלוגיים
7. עקומת היענות של מערכת השידור והקליטה

2.1 - רקע עיוני:

2.1.1 - משדרים (עקרונות יסוד ודיודות פולטות אור – LED)

בתקשורת אופטית משתמשים בעיקר במשדרים מבוססי מוליכים למחצה בגלל שהם יעילים מבחינה אנרגטית, קטנים יחסית, מתאימים לאפנון בתדרים גבוהים יחסית, אמינים ויש להם אורך גל מתאים לתקשורת וכמובן בגלל המחיר שלהם. ישנם שני סוגי משדרים מבוססי מוליכים למחצה, LD ו-LED. בניסוי זה נתמקד במקור אור מסוג LED (בניסויים אחרים נכיר גם את ה-LD). הפליטה ב-LD היא מאולצת ואילו הפליטה ב-LED היא ספונטנית.



איור 2.1 – בליעה a, פליטה ספונטנית b ופליטה מאולצת c

שלושת המנגנונים שבאיור 3.1 תלויים זה בזה מבחינת קצב התרחשותם. אם נסמן את צפיפות המצבים המעוררים של החומר ב- N_2 ואת צפיפות המצבים הלא מעוררים של החומר ב- N_1 , אזי קצב ההתרחשות של כל אחד מהמנגנונים ניתן לפי המשוואות הבאות:

$$\begin{aligned} R_{SPON} &= AN_2 \\ R_{STIM} &= BN_2\rho(\lambda) \\ R_{ABS} &= B'N_1\rho(\lambda) \end{aligned} \quad (1)$$

כאשר A, B ו- B' הם קבועים ו- $\rho(\lambda)$ היא צפיפות הקרינה האלקטרומגנטית, דהיינו עצמת הקרינה ליחידת אורך גל ליחידת נפח (ברור שקצב הבליעה והפליטה המאולצת תלויים בספקטרום הקרינה הפוגעת בחומר

ואילו הפליטה הספונטנית (לא). בשיווי משקל תרמודינמי קצב הפליטה חייב להיות שווה לקצב הבליעה (כלומר האנרגיה הנבלעת היא האנרגיה הנפלטת, זוהי המשמעות של שיווי משקל), ולכן:

$$\begin{aligned} R_{SPON} + R_{STIM} &= R_{ABS} \\ AN_2 + BN_2\rho(\lambda) &= B'N_1\rho(\lambda) \end{aligned} \quad (2)$$

בשיווי משקל תרמודינמי היחס בין המצבים המעוררים לבלתי מעוררים ניתן ע"י התפלגות בולצמן (ללא הוכחה, דבר זה ידוע מתוך התורה התרמו דינמית):

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp(-E_g/k_B T) = \exp(-h\nu/k_B T) \quad (3)$$

וצפיפות הקרינה האלקטרומגנטית ניתנת ע"י פלנק (ללא הוכחה, דבר זה ידוע מתוך התורה התרמו דינמית):

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3 / c^3}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} \quad (4)$$

ע"י הצבת משוואה 3 ב- 2 והשוואת מקדמים עם משוואה 4 נקבל את הקשרים בין קבועי הקצב (נקראים על שמו של איינשטיין – קבועי איינשטיין):

$$\begin{aligned} A &= (8\pi h \nu^3 / c^3) B \\ \text{and} \\ B &= B' \end{aligned} \quad (5)$$

מתוך הקבועים שמצאנו, ולאחר הצבה במשוואת הקצב, ניתן לומר את הדברים הבאים:

1. קצב הפליטה המאולצת יכול להיות גבוה בהרבה הן מקצב הבליעה והן מקצב הפליטה הספונטנית. דבר

זה מתרחש כאשר $h\nu \ll k_B T$. ראה את משוואה 6 בהמשך.

2. בטמפרטורת החדר ובשיווי משקל תרמודינמי, בתחום של האינפרא אדום הקרוב והאור הלבן, פליטה

ספונטנית תמיד נעשית בקצב גבוה בהרבה מקצב הפליטה המאולצת (בטמפרטורת החדר, שכן מתקיים

$$h\nu \gg K_B T$$

$$\frac{R_{STIM}}{R_{SPON}} = [\exp(h\nu/k_B T) - 1]^{-1} \ll 1 \quad (6)$$

המסקנה היא שחייבים לעבוד מחוץ למצב שיווי משקל תרמו דינמי כדי לקבל פליטה מאולצת. שיווי המשקל התרמו דינמי נשבר ע"י מקור חיצוני (לרוב ממתח) שגורם להיפוך אוכלוסין כך ש- $N_2 > N_1$ ואז קצב הפליטה המאולצת גדול בהרבה מקצב הפליטה הספונטנית. כפי שמובן, פליטה מאולצת יכולה להתרחש רק כאשר הרמה האנרגטית המעוררת של החומר מאוכלסת והרמה הוולנטית היסודית (ערכית) של החומר איננה מאוכלסת. צפיפות ההסתברות לאכלוס הרמות הללו ניתנת ע"י התפלגות פרמי-דירק:

$$\begin{aligned} f_C(E_2) &= \{1 + \exp[(E_2 - E_{fC})/k_B T]\}^{-1} \\ f_V(E_1) &= \{1 + \exp[(E_1 - E_{fV})/k_B T]\}^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

כאשר E_{fC} ו- E_{fV} הן הרמה הגבוהה ביותר שמאוכלסת בפס ההולכה והערכיות, בהתאמה. ברור שעל מנת

שיהיו יותר מצבים מעוררים מאוכלסים (באלקטרון) ההסתברות לאכלוס מצב מעורר צריכה להיות גדולה

מההסתברות לאכלוס מצב לא מעורר, כלומר חייב להתקיים:

$$f_C(E_2) > f_V(E_1) \Rightarrow E_{fC} - E_{fV} > E_2 - E_1 > E_g = E_C - E_V \quad (8)$$

כלומר, על מנת שיתרחש היפוך אוכלוסין יש להפריד את רמות פרמי בפער אנרגטי העולה על הפרש הרמות בין רמת ההולכה לרמת הערכיות (בשיווי משקל תרמודינמי הרמות הללו מתלכדות לכדי רמה אחת המצויה בין רמת ההולכה לרמת הערכיות). במשדרים מבוססי מוליכים למחצה היפוך האוכלוסין בד"כ נעשה ע"י ממתח קדמי של צומת p-n.

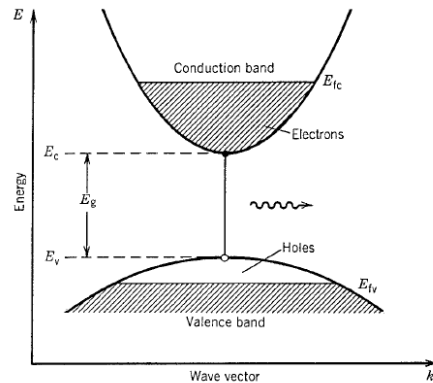


Figure 3.2: Conduction and valence bands of a semiconductor. Electrons in the conduction band and holes in the valence band can recombine and emit a photon through spontaneous emission as well as through stimulated emission.

איור 2.2 – דיאגרמת רמות אנרגיה במוליך למחצה

נזכיר כי צומת p-n נוצרת ע"י מוליך למחצה המזוהם ע"י מזהמים שהם תורמים (Donors) ומקבלים (Acceptors). מוליך למחצה מסוג n נוצר ע"י אילוח באמצעות אטומים "תורמים" (אטומים שתורמים אלקטרון באנרגיה גבוהה יחסית לסריג) ואילו מוליך למחצה מסוג p נוצר ע"י אילוח באמצעות אטומים "מקבלים" (אטומים שמושכים אלקטרון מהסריג – תורמים חור). צומת p-n פשוטה יכולה להבנות ע"י מל"מ אחד שמזוהם באופן שונה בשתי נקודות סמוכות (homojunction), ואילו צומת p-n מורכבת יכולה להבנות באותו האופן בתוספת שכבה אמצעית (מבנה כזה מכונה double heterojunction).

בצומת p-n מתחרח תהליך דיפוזיבי שבו נושאי מטען שלילי עוברים מהמל"מ n לאזור המל"מ p ונושאי מטען חיובי עוברים מאזור המל"מ p לאזור המל"מ n. התהליך נמשך עד אשר נבנה שדה חשמלי פנימי מספיק גדול המונע את המשך מעבר המטענים בצומת (כיוונו של השדה מ- n ל- p). אם כעת ממתחים את הצומת בממתח קדמי (כך שההדק החיובי מחובר למל"מ מסוג p) השדה בצומת נהרס והצומת מתמלאת בנושאי מטען שעשויים להתחבר (בתהליך המכונה ריקומבינציה) ולפלוט פוטון. הזרם החשמלי שמתקבל בתהליך זה ניתן לפי המשוואה הידועה הבאה:

$$I = I_s [\exp(qV / k_B T) - 1] \quad (9)$$

כאשר I_s הוא קבוע, q הוא מטען האלקטרון, V הוא הפרש הפוטנציאל בצומת, k_B הוא קבוע בולצמן ו- T היא הטמפרטורה (ביחידות של קלווין).

לצומת p-n הטרוגנית יש יתרון בולט על פני צומת הומוגנית. בצומת p-n הומוגנית נושאי המטען מדפוזים לתוך שכבת המחסור שיכולה להשתרע על פני $1-10 \mu m$. כתוצרה מכך, הצפיפות של נושאי המטען בשכבה איננה גדולה ולכן כמות השחבורים שמתקבלת ברגע איננה תמיד מספקת. לעומת זאת, ע"י הוספת שכבה

אמצעית שלישית דקה לפי המבנה ההטרוגני, בשל הפרש הרמות השונה שלה, נוצרת אי רציפות במבנה הרמות בצומת מה שגורם לכליאה של נושאי המטען בתוך השכבה האמצעית הדקה ($0.1\mu\text{m}$). בשל הצפיפות הרבה של המטענים נוצרים שחבורים רבים בכל רגע (הצפיפות הגבוהה פשוט מגבירה את ההסתברות לשחבור) ולכן יעילות ההתקן עולה.

במהלך השחבור של נושאי המטען בצומת לא תמיד משתחררים פוטונים, רוצה לומר ישנם שחבורים רבים שאינם מסתיימים בפוטון. קיימים שלושה שחבורים שאינם מסתיימים בפוטון:

1. שיחבור בפגמים (Defect Recombination) בסריג.
2. שיחבור על פני השטח.
3. שיחבור במנגנון אוז'ה. בשחבור זה הקרינה הנפלטת מהשחבור משמשת לערעור אלקטרון אחר, כך שהתוצאה הסופית היא שלא נפלט פוטון מעצם השחבור אלא מעורר אלקטרון אחר.

לפיכך, מגדירים יעילות קוונטית פנימית לפי קצבי השחבור שבגינם מתקבלת קרינה R_{rr} (Radiative Recombination) וכאלה שבגינם לא מתקבלת קרינה R_{nr} (Non radiative Recombination):

$$\eta_{int} = \frac{R_{rr}}{R_{nr} + R_{rr}} \quad (10)$$

כאשר $R_{rr} = R_{spon} + R_{stim}$. נוהגים להגדיר את קצבי השחבורים ע"י זמן החיים לשחבור τ_{rr} (ולאי שחבור τ_{nr}) ומספר נושאי המטען שהתחברו N:

$$\begin{aligned} R_{rr} &= N / \tau_{rr} \\ R_{nr} &= N / \tau_{nr} \\ \eta_{int} &= \frac{1/\tau_{rr}}{1/\tau_{rr} + 1/\tau_{nr}} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_{rr}} \end{aligned} \quad (11)$$

כאשר ערכים אופייניים לנצילות הקוונטית עבור LED הם 0.5 ועבור LD הם כמעט 1. עבור דיודות פולטות אור קצב השחבור של פליטה מאולצת קטן למדי ולכן $R_{rr} \approx R_{spon}$. נהוג להביע את קצב השחבור הכללי (הן שגורם לקרינה והם שלא) ע"י זמן החיים של אלקטרון-חור לפי:

$$R \approx R_{nr} + R_{spon} = N / \tau_C \quad (12)$$

באשר לסוגי מוליכי המחצה המהווים את צומת ה-p-n ניתן לומר שכמעט כל מוליך למחצה יכול להיות צומת p-n הומוגנית אבל רק מוליכים למחצה מסוימים יכולים להיות צומת p-n הטרופנית. הסיבה לכך נעוצה בעובדה שתוספת השכבה האמצעית מורידה את יעילות השחבור בצורה ניכרת אם קיימת אי תאימות בין קבוע הסריג של המל"מ בשכבה האקטיבית לבין המל"מ שבמעטה (אחרת יש הרבה פגמים בסריג של המל"מ והיעילות יורדת). עבור מספר חומרים מתאימים ליצירת LED – LD ניתן להעריך את פער רמות האנרגיה לפי הרכב החומרים ע"י הנוסחאות האימפריות הבאות:

(13)

$$E_g(x) \approx hc/\lambda = 1.424 + 1.247x, \quad 0 < x < 0.45 \quad \text{for: } Al_xGa_{1-x}As$$

$$E_g(y) \approx hc/\lambda = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2, \quad 0 \leq y \leq 1 \quad \text{for: } In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} \quad \text{and } x/y = 0.45$$

LED - 2.2

צומת p-n בממתח קידמי מהווה דיודת פליטת אור בצורה הפשוטה ביותר שלה. בהתקן זה הקרינה הנפלטת היא איננה קוהרנטית, יש לה רוחב סרט רחב יחסית 30-60 nm והיא נפלטת בזווית פיזור רחבה יחסית ($\theta_{FWHM} \approx 120^\circ$ עבור דיודה משטחית ועבור דיודת שפה $\theta_{FWHM} \approx 30^\circ$).

ההספק שניפלט בצומת (כלומר ההספק הפנימי) במצב של S.S תלוי בזרם בצומת וביעילות השחבור (יעילות קוונטית פנימית) של הדיודה. מכיוון שכמות השחבורים בצומת הינה I/q נרשום:

$$P_{int} = \eta_{int} \frac{I}{q} \hbar \omega \quad (14)$$

כלומר ניתן לראות שההספק המוצא של ה-LED הוא פרופורציוני לזרם בצומת I. באופן עקרוני קיימים הפסדים נוספים שנובעים מהחזרות של המשטחים השונים בהתקן. מסמנים את היעילות במעבר האור מהצומת למוצא ה-LED ב- η_{ext} , יעילות זו ניתנת להערכה ע"י הנוסחה:

$$\eta_{ext} \approx n^{-1}(1+n)^{-2} \quad (15)$$

את הקרינה הנפלטת אל מחוץ להתקן מזינים לתוך סיב אופטי כך שיעילות הזיווג של הדיודה מתנהגת לפי:

$$\eta_c \propto (NA)^2 \quad (16)$$

כאשר מתייחסים לדיודה בלבד, ניתן לרשום את היעילות הכללית של ההתקן ע"י היחס בין ההספק החשמלי הניתן להתקן וההספק האופטי שמתקבל בתמורה, כאשר הספק החשמלי ניתן ע"י IV_0 (זרם ישר):

$$\eta_{total} = P_e / P_{electrical} = \left(\eta_{ext} \eta_{int} \frac{I}{q} \hbar \omega \right) / IV_0 = \eta_{ext} \eta_{int} \frac{\hbar \omega}{qV_0} \approx \eta_{ext} \eta_{int} \quad (17)$$

$$\eta_{total} = P_e / P_{electrical} \approx \eta_{ext} \eta_{int}$$

לעיתים מגדירים גודל חשוב נוסף המתאר את הקשר בין ההספק האופטי המתקבל מההתקן לעצמת הזרם שמוזרק להתקן, גודל זה מכונה Responsivity:

$$R_{LED} = P_e / I = \eta_{ext} \eta_{int} \frac{\hbar \omega}{q} \quad (18)$$

היחס הזה נשאר ליניארי עד לזרם של קצת מעל 100 mA. כאשר עצמת הזרם גדולה מסף מסוים, ההתקן מתחמם והיעילות הקוונטית הפנימית שלו משתנה (יותר שחבורים אינם הופכים לפוטונים) ביחד עם שינוי ביעילות החיצונית התלויה במקדם השבירה שתלוי גם הוא בטמפרטורה.

לשימושים של תקשורת חשוב להבין מהו רוחב הפס שבו ניתן לאפנן דיודות פולטות אור, כך שיהיה ניתן לשדר סיביות באמצעותה. כאמור, ההספק הנפלט מהדיודה קשור לכמות נושאי המטען המתחברים N. מאחר שבמקרה המאופנן כמות זו משתנה בכל רגע עם הזרם נרשום (כאן V זה נפח השכבה האקטיבית):

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\overbrace{I}^{total}}{qV} - \overbrace{N/\tau_c}^{bias} \quad (19)$$

אם ניקח זרם סינוסואידלי מהצורה (לנוחות נרשום אותו באופן קומפלקסי):

$$I(t) = I_b + I_m \exp(i\omega_m t) \quad (20)$$

כאשר ω_m זה תדר המודולציה, I_m זה האמפליטודה של המודולציה ו- I_b זה הזרם שעליו רוחב האות המאופנן. הפתרון למשוואה הדיפרנציאלית יהיה מהצורה:

$$N(t) = N_b + N_m \exp(i\omega_m t)$$

where,

$$N_b = \tau_c I_b / qV \quad (21)$$

$$N_m(\omega_m) = \frac{\tau_c I_m / qV}{1 + i\omega_m \tau_c}$$

ניתן אם כן לתאר את האפנון של ה-LED ע"י פונקציית תמסורת:

$$H(\omega_m) = \frac{N_m(\omega_m)}{N_m(0)} = \frac{1}{1 + i\omega_m \tau_c} \quad (22)$$

מתוך פונקציית התמסורת ניכר, שההתקן מתנהג כמו מסנן מעביר נמוכים. הקריטריון לרוחב הסרט הוא התדר,

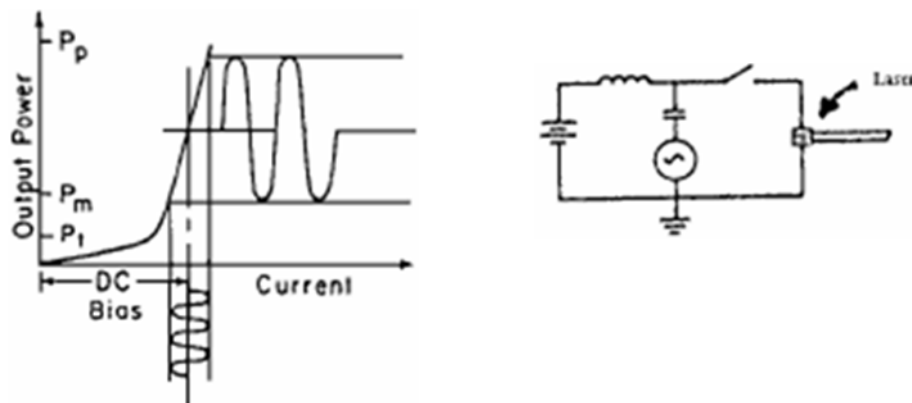
$$(\propto \frac{1}{2} |H(\omega_m)|^2) \text{ יורד לחצי}$$

$$\Delta f = 1/2\pi\tau_c \quad (23)$$

עבור LED פשוטה זמן החיים של נושאי המטען הוא 2-5 nsec, ולכן רוחב הסרט המרבי הוא 140 MHz. בפועל משתמשים ב-LED לרשתות LAN עד 100 MHz ורק למספר ק"מ בודדים (בגלל רוחב הפס הרחב יחסית).

2.3 - אפנון ישיר של לייזר או LED:

ע"י שינוי הזרם המסופק ללייזר (או ל-LED) ניתן לשלוט על עוצמת האור שההתקן LED- פולט. ניתן לבצע אם כן אפנון ישיר של האור ע"י אות המידע. באיור 2.3 ישנו גרף המתאר את התלות של עוצמת האור שדיודת לייזר פולטת בתלות בזרם המסופק. יש לספק זרם ביאס כדי לעבודת בנקודת עבודה נוחה.



איור 2.3 – אפנון ישיר של LED או LD

2.4 - גלאים ופוטו דיודה

פוטו דיודה הינה דיודה שממותחת בממתח אחורי ובמקום לפלוט אור היא יוצרת זרם חשמלי בעת פגיעת הפוטונים בצומת. הפוטו דיודה היא למעשה גלאי קוונטי כאשר גלאים קוונטים הם גלאים רגישים למספר הפוטונים הפגיעים בהם ברגע ולאורך הגל שלהם. מעל לאורך גל מסוים הגלאי אינו רגיש ולא נקבל גילוי לקרינה, אורך הגל הזה מכונה אורך הגל לקטעון (או תדר הקטעון) והוא מסומן λ_{cut} .

2.4.1 - פרמטרים חשובים בגלאים קוונטים:

1. קצב הגעת פוטונים (r): זרם האלקטרונים הנפלט מהגלאי תלוי בקצב הגעת הפוטונים נגדיר את קצב הגעת הפוטונים ע"י:

$$r = \frac{P_s}{h\nu} \quad (24)$$

כאשר P_s הוא הספק האנרגיה הפוגעת בגלאי, $h\nu$ הוא הספק של פוטון אחד.

2. נצילות קוונטית η : גודל זה מתאר את היחס בין מספר הפוטונים הפוגעים בגלאי לבין מספר האלקטרונים הנפלטים עקב הפגיעה. הזרם הנפלט מהגלאי תלוי בקצב הפוטונים הפוגע ובנצילות הקוונטית וכן במטען האלקטרון:

$$I_s = \eta q \frac{P_s}{h\nu} \quad (25)$$

3. תגובתיות - Responsivity: היחס בין הזרם הנפלט מהגלאי לבין הזרם הפוגע.

$$R(\lambda) = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{I_s}{P_s} \quad (26)$$

4. זמן עלייה של הגלאי t_r : הוא הזמן הנמדד מנקודה 10% ל- 90% מערך הזרם המקסימלי במוצא אשר נוצר בתגובה לאות אופטי ריבועי.

2.4.2 - עקרון פעולת הפוטודיודה

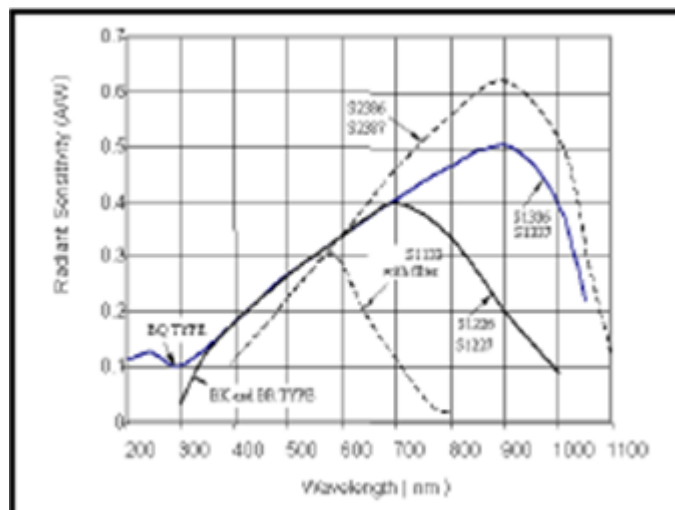
כמו המשדר כך גם המקלט מהווה אחד מאבני הבניין הדרושים לצורך תקשורת. מטרתו של המקלט להמיר את האות אופטי לאות חשמלי שניתן לעבדו. העיקרון הבסיסי של גלאי אופטי מבוסס מוליך למחצה הוא שכאשר אנרגיה של פוטון הפוגע בגלאי גדולה מהאנרגיה הדרושה ליצירת זוג אלקטרון-חור הפירוד הזה אכן נוצר. מאחר והגלאי ממותח ע"י ממתח חיצוני מתחילים החורים להיסחף אל איבר ההדק השלילי והאלקטרונים אל איבר ההדק החיובי וכך נוצר זרם חשמלי בתמורה לשטף הפוטונים היוצרים אותו. כדי לשחרר אלקטרון, האנרגיה של הפוטון הפוגע צריכה להספיק כדי להקפיץ אלקטרון מרמת היסוד (הערכיות) לרמת ההולכה. לכן, לפוטון הפוגע צריכה להיות אנרגיה גדולה או שווה לפער האנרגיה בין שתי הרמות.

$$E_{ph} \geq E_g = E_C - E_V \quad (27)$$

מתוך משוואה 27, ניתן לחשב את אורך גל לקטעון:

$$\lambda_{cut} = \frac{hc}{E_g} = \frac{12400}{E_g} [nm] \quad (28)$$

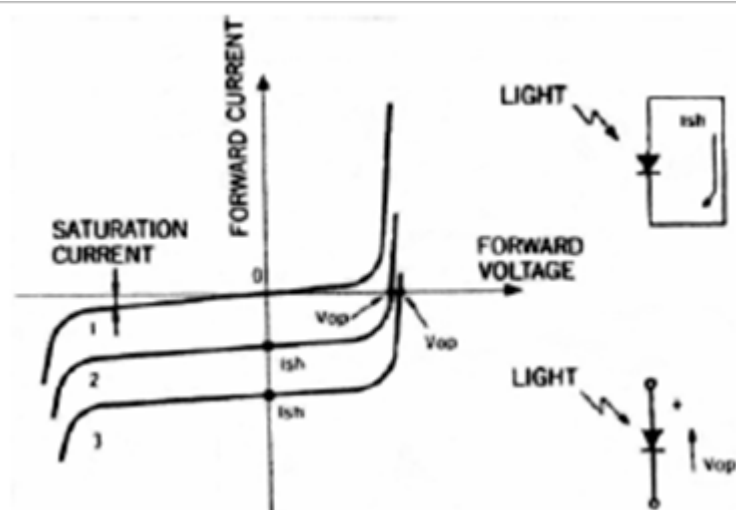
מעל לאורך גל זה לא יתגלה פוטון. באיור 2.4 ישנם גרפים המציגים תגובתיות ספקטראלית של מספר גלאים. ניתן להבחין כי בנוסף לתדר הקטעון המגביל את רגישות הפוטודיודה באורכי הגל הארוכים ישנה גם ירידה בתגובתיות. (זכור שככל שאורך הגל גדול יותר כך האנרגיה של הפוטון נמוכה יותר!). באורכי הגל הקצרים הירידה בתגובתיות נובעת מהעובדה שמעט יותר פוטונים מצליחים לחדור לעומק המל"מ כאשר אורך הגל קצר (ככל שאורך הגל קצר יותר כך עומק החדירה קטן יותר והפוטונים הפוגעים בהתקן נבלעים על פני השטח). במקרה כזה הסיכוי לשחבור אלקטרון חור הוא גבוה (בגלל שצפיפות הפירוטים גבוהה מאוד) ורק חלק קטן מהאלקטרונים/חורים יצליח להגיע להדקים.



איור 2.4- תגובתיות ספקטראלית של מספר פוטודיודות שונות

2.5 - אופיין זרם-מתח של פוטודיודה

עקומה (1) באיור 2.5 מציגה אופיין זרם-מתח של הפוטודיודה כאשר הדיודה אינה מוארת. הזרם שמקבלים בממתח הפוך הוא זרם הרוויה האחורי והוא קובע את זרם החושך (זרם החושך תלוי גם בטמפרטורה). קיימת הגדלה בזרם החושך עם הגדלת הממתח ההפוך המופעל על הפוטודיודה. עקומות (2) ו-(3) באיור 2.5 מראות את הזרם בעת הארת הפוטודיודה. עוצמת אור גדולה יותר גורמת לזרם גדול יותר והקשר הוא ליניארי.



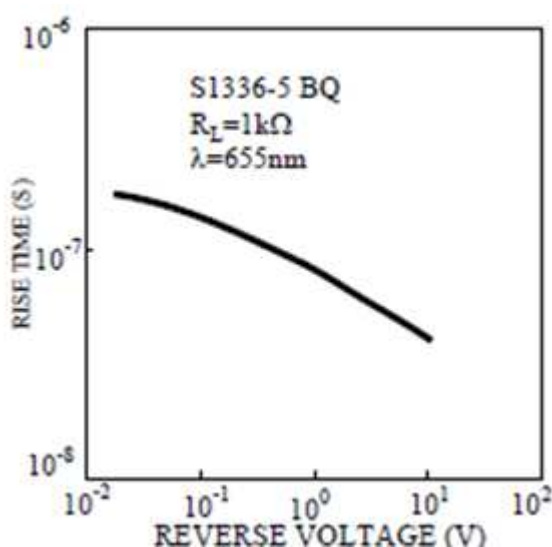
איור 2.5 – אופיין זרם מתח של פוטודיודה

2.6 - תלות מהירות עלית הזרם בממתח הפוך

ניתן לשפר את זמן העלית הזרם ע"י הגדלת הממתח ההפוך (ככל שהממתח גדול יותר, כך השדה לאורך ההתקן גדול יותר ולכן האלקטרונים/חורים מאיצים מהר יותר אל איבר ההדקים). התנהגות אופיינית של זמן עליה כפונקציה של ממתח אחורי נתונה באיור 2.6. היתרון של הקטנת זמן התגובה הוא בקצב המידע הגבוה שניתן

לגלות במקלט (כלומר להגדלת רוחב הסרט $\Delta f = \frac{1}{2\pi(\tau_{RC} + \tau_{tr})}$), יתרון זה מלווה בחיסרון של הגדלת זרם

החושך ומכאן להגדלת ה-NEP והקטנת יחס אות לרעש SNR. הקשר בין NEP לבין זרם החושך הוא קשר ליניארי בקירוב.



2.6 – זמן עלית הזרם בתלות בממתח האחור

NEP-Noise equivalent power

זהו פרמטר המגדיר את רגישות המקלט לרעש.

$$NEP = \frac{P_{S \min}}{\sqrt{B_n}} \quad (29)$$

כאשר $P_{S \min}$ הוא הספק ששווה להספק הרעש במבוא המקלט, במילים אחרות הוא ההספק עבורו מתקבל יחס אות לרעש שווה 1. B_n הוא רוחב הסרט של המקלט/גלאי.

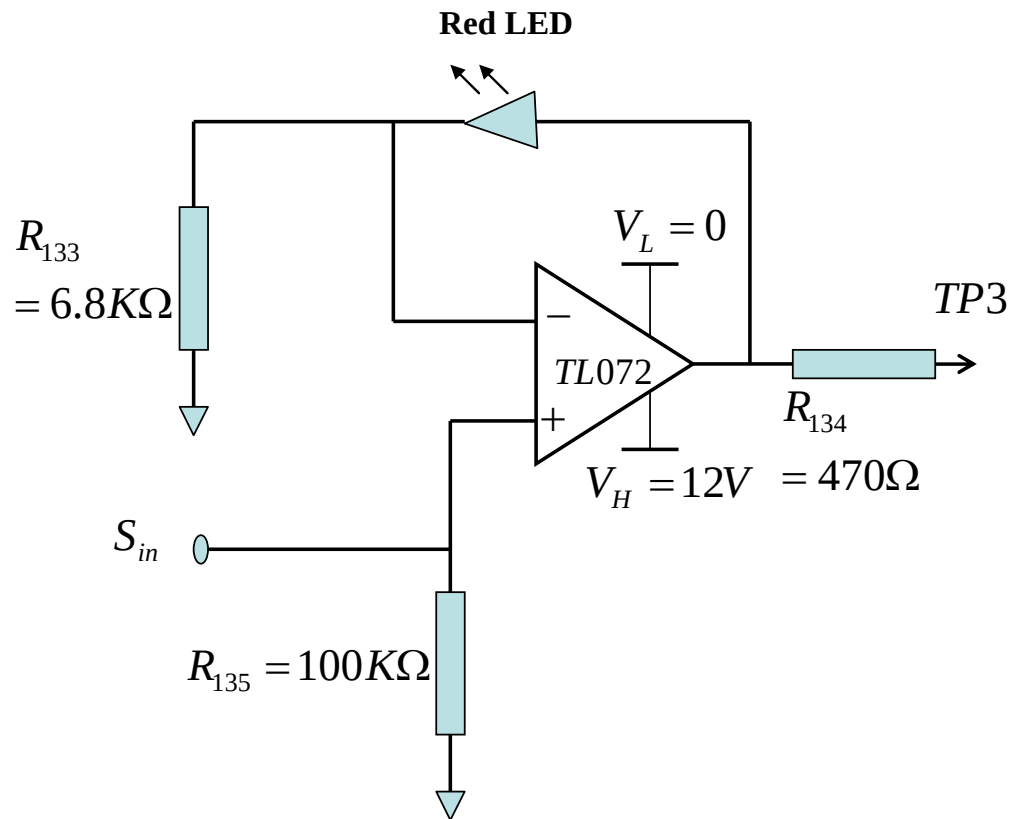
הרעשים בעלי השפעה עיקרית על המקלט הם:

1. רעש רקע- נובע מקרינת רקע
 2. רעש ג'ונסון (Johnson/thermal noise)
 3. Shot noise
 4. זרם חושך
- הגדלת הרעשים הפנימיים תגרום להגדלת הערך המינימאלי הניתן לגילוי ותגרום להגדלת ה-NEP. גלאי טוב הוא גלאי בעל NEP נמוך יותר.

2.7 - שאלות הכנה:

1. הסבר בקצרה מהו ההבדל בין דיודה פולטת אור LED לבין דיודת לייזר LD.
2. הנח מצב עמיד (steady-state) ותן ביטוי לקשרים הבאים:
$$\frac{R_{STIM}}{R_{ABS}} - \frac{R_{SPON}}{R_{ABS}}$$
חשב את היחס בין קצב הפליטה המאולצת לקצב הפליטה הספונטנית בטמפרטות החדר (20 מעלות) כאשר מדובר בקרינה באורך גל $1.55 \mu m$, הסבר משמעות התשובה.
3. אם נתון כי המתח על הדיודה בהולכה הוא 1.5V, חשב זרם הדיודה ומתח המוצא כאשר בכניסה מאלצים מתח 2V.

4. בניסוי נפעיל את ה-LED ע"י המעגל הבא:



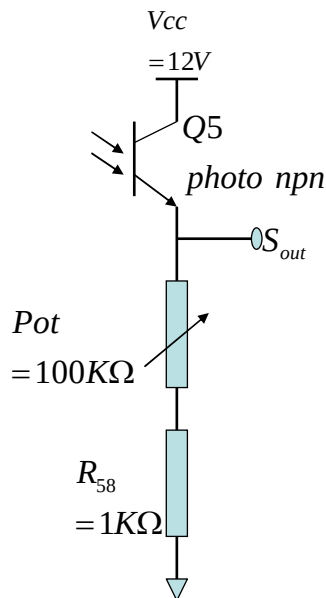
רשום את הקשר בין הזרם בדiodה ה-LED לבין אות הכניסה S_{in} , הנח שהתנגדות הדiodה קטנה ביחס לנגד R_{133} .

5. נניח כי הדiodה הנתונה בשאלה 4 משמשת לאפנן את המידע. משתמשים באופיין הדiodה כדי לעמוד על מאפייני האפנן. נניח כי הקשר בין הספק האור במוצא הדiodה לבין הזרם בדiodה דומה לאופיין הנתון באיור 2.3, ונניח בקירוב כי הדiodה מתחילה להוליך כאשר הזרם דרכה הוא $I_{LED} \geq 2mA$. החל מזרם זה הדiodה מתחילה להתנהג ליניארית בקשר בין הזרם להספק ההארה. היחס הליניארי מתקיים כאשר הזרם בדiodה הוא בתחום $20mA \geq I_{LED} \geq 2mA$. מהם הערכים הקיצוניים של מתח הכניסה S_{in} שעבורם מקבלים אות מוצא ללא עיוותים, מהו מתח המוצא של המגבר בכל אחד ממתחי הכניסה (הנח שהתנגדות הדiodה היא $2k\Omega$).

6. בהמשך לשאלה הקודמת, אם בוחרים שהכניסה S_{in} תהיה אות סינוסי בתדר $1KHz$ צייר את האות בעל

התנופה המקסימאלית שעבורו מקבלים מוצא ללא עיוותים, כולל ערך ה-DC אם ישנו כזה.

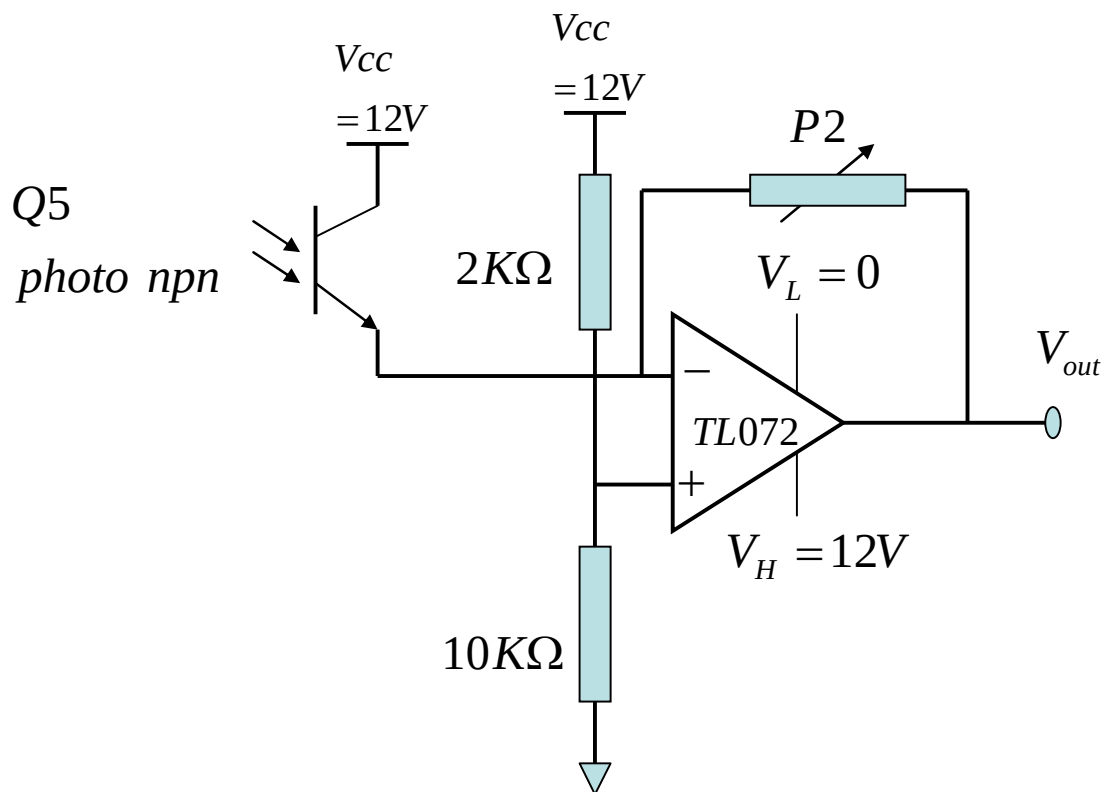
7. כאשר מפעילים מקלט אופטי המבוסס על פוטו-טרנזיסטור משתמשים במעגל הבא (חיבור מסוג עכבה גבוהה (High Impedance):



המקלט האופטי מבוסס על פוטו-טרנזיסטור. הפוטו-טרנזיסטור הוא טרנזיסטור *npn* ללא רגל בסיס. במקום זאת הרכיב נמצא במעטה פלסטיק שקוף המאפשר לאור להגיע לבסיס שלו. הארה תגרום למל"מ מסוג p לקבל אופי של מל"מ מסוג n (הסיבה לכך היא שהארה גורמת ליצירת אלקטרונים וחורים שמשנים מעט את מבנה הרמות של המל"מ p ומקרבים אותו למבנה רמות של מל"מ מסוג n) וכך תיהרס הצומת ויתחיל לזרום זרם בין הפולט לקולט. הנח כי הקשר בין עוצמת האור הפוגע לבין הזרם בקולט של הטרנזיסטור הוא קשר ליניארי, קרא לקבוע הפרופורציה ביניהם K . מהו הקשר בין מתח המוצא S_{out} לבין עוצמת האור בכניסה לבסיס הטרנזיסטור.

8. ציין מהו תפקידו של הפוטנציומטר הנמצא בפולט הטרנזיסטור. איך הוא משפיע על המרת האור הפוגע למתח חשמלי במוצא הרכיב? מהו הקשר שלו לרגישות ההמרה?

9. הבעיה במעגל שבשאלה 7 היא השתנות מפל המתח שעל הפוטו-טרנזיסטור (בין הקולט לפולט) ככל שעוצמת האור חזקה יותר, דבר שיכול לפגוע באופן העבודה בו נמצא הטרנזיסטור (מפל מתח משתנה יגרום למהירות התגובה להיות שונה, לכן במצב של הארה גבוהה רוחב הסרט של הגלאי יהיה שונה ממצב של הארה נמוכה – זה כמובן לא רצוי). כדי לפתור את הבעיה הזו משתמשים במעגל הנקרא ממיר עכבה (Trans Impedance) - מעגל זה קיים בערכה ונראה בצורה הבאה:



הראה איך מעגל זה קובע מתח קבוע בין הקולט לפולט של הטרנזיסטור V_{CE} . מהו המתח הנופל על הגלאי?
 10. מהו תפקידו של הפוטנציומטר $P2$ במעגל? הנח שוב כי הקשר בין עוצמת האור בבסיס הטרנזיסטור לבין זרם הקולט היא ליניארית. קרא לקבוע הפרופורציה K ורשום את מתח המוצא כפונקציה של עוצמת האור בכניסה P והפוטנציומטר $P2$.

הציוד הנדרש לניסוי:

TPS-3481	1.
ספק כוח	2.
סיב אופטי- משולב עם הערכה	3.
מחולל אותות	4.
סקופ	5.
חוטי גישור	6.

2.8 - מהלך הניסוי:

1. חבר את הערכה TPS-3481 אל ספק הכוח, חבר הספק אל הרשת, הפעל המתג הראשי בערכה.
2. פרק הסיב האופטי, חבר את כניסת המגבר (במעגל Optical Transmitter) למקור מתח משתנה V_{Var} שבערכה.
3. שנה את מתח המבוא והתבונן בשינוי בעוצמת האור ב- LED (הדיודה Led1).

4. חזור על התהליך ומלא הטבלה הבאה (חבר סקופ ליציאה ולכניסת המעגל ורשום את המתח):

V_{in}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{out}											

5. יצר ממחולל האותות גל סינוסי, אמפליטודה 1 וולט ו-DC 2.8 וולט ובתדר נמוך של 5 הרץ,

והתבונן בהבהוב של ה-LED.

6. חבר את שני הערוצים של הסקופ לכניסה וליציאה של מעגל השידור, כוון את המתח בכניסה

לעוצמה המכסימלית בלי לקבל קטימה או עיוות במתח המוצא. (DC של 5 וולט, שחק עם

האמפליטודה של גל המבוא עד לקבלת רוויה).

7. שנה את תדירות המבוא כדי למדוד את רוחב הסרט של מעגל השידור.

לדו"ח המסכם: צייר אופיין המשדר (זרם בדיודה כנגד מתח מבוא למעגל), צייר מהלך האותות במבוא

ובמוצא של המשדר עבור כניסה הרמונית, מדוד את רוחב הסרט של המשדר. ציין מהו התחום

הליניארי של ה-LED מבחינת מתח הכניסה.

מצעד זה והלאה נבצע מדידות במעגל הקליטה.

8. חבר את כניסת המשדר האופטי למתח V_{12} , כך שנקבל עוצמת הארה מרבית ב-LED המשדר.

9. זהה את שקעי הסיב האופטי של המשדר האופטי והמקלט האופטי.

10. תקע הסיב האופטי בשקעי הסיב, כך שיעביר את האור מהמשדר למקלט האופטי.

11. חבר מד מתח ליציאת המקלט האופטי S_{out} .

12. שנה את פוטנציומטר הרגישות ומדוד את המתח במוצא המקלט.

13. כוון את נגד הרגישות למקסימום, חבר את כניסת המשדר האופטי למקור מתח משתנה V_{VAR} ,

שנה את המתח בכניסת המשדר האופטי, מדוד את המתח במוצא המקלט האופטי ומלא את הטבלה

הבאה:

V_{in}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{out}											

כוון את כפתור הרגישות כך שתקבל V_{out} מקסימאלי בכל מדידה.

14. כוון את המחולל לסינגל סינוסי, תדר 1KHz , אמפליטודה 4 וולט ו-DC 5 וולט, חבר את CH1 של הסקופ לכניסת המשדר האופטי, חבר CH2 ליציאת המקלט האופטי, כוון פוטנציומטר הרגישות לקבלת אות מקסימאלי, שרטט את שני האותות שהתקבלו על מסך הסקופ. האם אות המידע ששידרת מופיע בגלאי?

15. שנה את אות המחולל לגל משולש, בדוק את הליניאריות של מערכת השידור והקליטה. שרטט את שני האותות שקיבלת.

16. העבר את מפסק S7 למצב ON. מפסק זה מפעיל את מעגל ה-Trans Impedance. הבחן בקשר שבין אות המבוא ואות המוצא, איזה לוגיקה קיימת כאן? (שים לב, על מנת שתבחין בקלות בסיגנאל המוצא, כוון את הסקופ של מוצא המקלט למצב AC).

17. כוון את פוטנציומטר הרגישות כדי לקבל אות מוצא מקסימאלי ללא עיוותים, במידת הצורך הורד את עוצמת המחולל, ובדוק את ליניאריות מערכת הקליטה ושידור.

18. **בדיקת רוחב סרט של המקלט:** מכיוון שהמעגל פועל בלוגיקה הפוכה, כוון מתח המחולל ל-4.0 וולט שיא לשיא, תדר 1KHz , וערך ממוצע 5 וולט כך שמתקבל במוצא מתח ללא עיוותים.

19. שנה את תדר המבוא בקפיצות של 5KHz וצייר גרף של תלות ההגבר בתדירות.

20. העבר את מפסק S7 למצב OFF. מפסק זה מפעיל המקלט ללא מגבר -Trans Impedance, אל תשנה את הפוטנציומטר כדי שתוכל להשוות את התנגדות המקלט להתנגדות המקלט הקודם.

21. שנה את תדירות המחולל ובדוק את עוצמת האות במוצא המקלט בתדרים שונים. בדוק לאחר כל שינוי תדירות שמתח המוצא של המחולל נשאר ללא שינוי. מלא הטבלה הבאה:

$f \text{ (KHz)}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{in}										
V_{out}										

לדו"ח המסכם: לצייר גרף מתח המוצא של המקלט נגד מתח הכניסה של המשדר. הגרף צריך להיות ליניארי (לתת הסבר), לשרטט גרפים של ההגבר כפונקציה של התדר (מתח מוצא של המקלט נגד התדר), למדוד את רוחב הסרט בשני סוגי החיבור מתוך הגרף.

ניסוי 3 – שימוש בסיבים אופטיים מרובי אופנים (MMF), מדידת NA

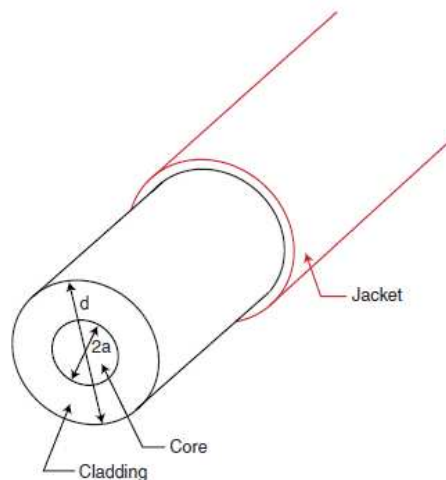
ומדידת הנחתה

3.1 הקדמה

במעבדה זו נלמד כיצד להכין סיבים אופטיים לשימוש במעבדה (או בשטח) וכן נמדוד שני פרמטרים חשובים ביותר של סיבים – המפתח הנומרי (NA) והנחתה (Attenuation).

3.2 מבנה של סיבים אופטיים

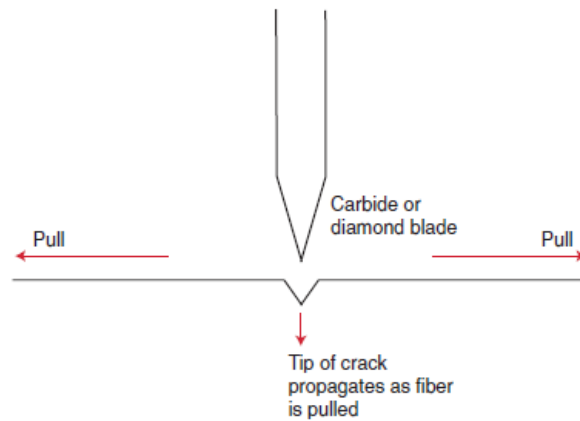
באיור 3.1 מופיע המבנה הגיאומטרי של סיב אופטי צילינדרי. באיור ניתן לראות שהסיב בנוי מליבה (core) בעלת קוטר $2a$ ומקדם שבירה n_1 , מעטה (cladding) בקוטר d ומקדם שבירה n_2 וכן מעטפת (Jacket) שקוטר בד"כ עומד על 250 או 900 מיקרומטר (בסיבים מסחריים נוהגים להוסיף מעטפת פלסטית נוספת בקוטר של 900-2000 מיקרומטר לשמירה בפני תנאי הסביבה כגון רטיבות ואבק). בד"כ עבור סיבי MMF קוטר הליבה נע בין 100-125 מיקרומטר בעוד שעבור סיבי SMF הוא משתנה בין 4-9 מיקרומטר. לעומת זאת, המעטה של סיבי MMF בד"כ משתנה בין 125-140 מיקרומטר ואילו עבור SMF הוא נע בתווך של 50-100 מיקרומטר. קיימים סיבים אחרים שאינם לצורך תקשורת בהם d יכול להגיע עד 1000 מיקרומטר.



איור 3.1 – המבנה של סיב אופטי

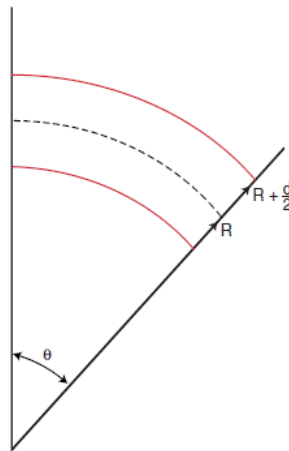
3.3 תכונות מכאניות של סיבים אופטיים

לפני מדידת ה-NA של הסיב יש צורך בהכנת הקצה של הסיב כך שיהיה ניתן לצמד לתוכו אור בצורה יעילה. על מנת שצימוד האור אל הסיב יהיה אפקטיבי עלינו לבצע חיתוך שיותר את קצה הסיב עם פני שטח משורים ככל שניתן. דבר זה נעשה ע"י שימוש ברכיב המכונה Fiber Cleaver ואשר באמצעותו מבצעים בקע קטן במעטפת הסיב ובתוך כדי שמותחים את שתי קצוות הסיב בצורה שווה (ראה איור 3.2).



איור 3.2 – ביקוע של סיב אופטי

התוצאה של הפעולה היא שהבקע הקטן שנוצר מתפשט לאורך שטח החתך של הסיב ומביא לחיתוכו. באופן עקרוני, סיבי סיליקה הם בעלי מאמץ שבירה של 5 GPa (כאשר $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$), אולם בשל אי הומוגניות של הסיב המאמץ הממשי הנדרש לשבירה של הסיב (מאמץ מתיחה) הוא נמוך בהרבה. סיב אופטי מסחרי בעל מעטה בקוטר של 125 מיקרומטר יהיה בעל מאמץ מתיחה לשבר של בערך 345 MPa. כאשר סדק קטן נעשה במעטה הסיב קוטר הסיב באזור הסדק קטן כך שבעת המתיחה הכוח באזור זה גדל ולכן זוהי הנקודה בה מתרחש השבר. הסדק יוצר שברים מחזוריים בקשרים האטומיים שבסביבת הסדק, שברים אלה הופכים גם הם לסדק שמתפשט עד לקריעה של הסיב.

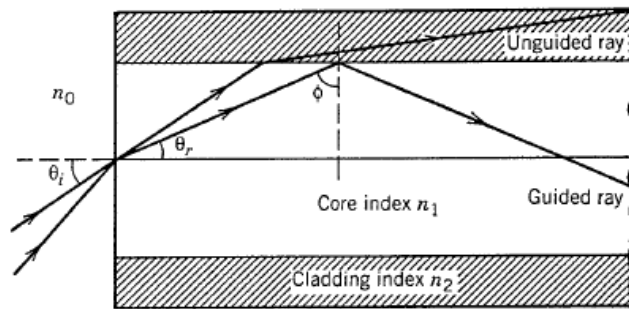


איור 3.3 – כיפוף של סיבים אופטיים

סיבים אופטיים נדרשים להיות בעלי גמישות מסוימת תוך כדי שמירה על כוחם המכאני. שברים במעטה של סיבים בד"כ מופיעים באזורים בהם יש מעוות גדול (מעוות הוא שינוי אורך הסיב ביחס לאורכו הכללי), אזורים אלה הם בד"כ האזורים בהם הסיב מכופף (ראה איור 3.3). עבור סיב בעל קוטר מעטה של d המכופף ברדיוס R מעוות פני השטח של הסיב נתון ע"י $\epsilon = [(d/2 + R)\theta - R\theta] / R\theta = d/2R$. באופן מעשי נמצא שכאשר המעוות קטן מאחד אחוז, כלומר $\epsilon \leq 0.01$, ניתן לעבוד עם הסיב לאורך שנים ופעולתו התקינה מובטחת. נוהגים להגביל את הכיפוף של סיבים לפי קריטריון של 0.5 אחוז עבור המעוות, מה שנותן רדיוס כיפוף מרבי של 12.5 מ"מ עבור סיב סטנדרטי עם מעטה בקוטר של 125 מיקרומטר.

3.4 מדידת המפתח הנומרי (NA)

המפתח הנומרי של סיב הוא למעשה כושר איסוף האור של הסיב, באופן מעשי מגדירים את ה-NA של סיב כסינוס הזווית המרבית שבה קרן אור הפוגעת בפני הסיב תיתמך ע"י הסיב. ניתן למצוא ביטוי אנליטי ל-NA מתוך ההגדרה הזו:



איור 3.4 – קרניים בסיב אופטי

באמצעות חוק סנל ועיקרון ההחזרה המלאה של קרניים ניתן לפתח מספר נוסחאות.

חוק סנל:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r$$

עקרון ההחזרה המלאה:

$$\sin \phi_c = n_2 / n_1$$

משני החוקים הללו ניתן להגיע להגבלה על זווית הפגיעה של הקרן הנכנסת לסיב:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin(\pi/2 - \phi_c) = n_1 \cos \phi_c = n_1 (1 - \sin^2 \phi_c)^{1/2} = n_1 \left(1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right)^{1/2}$$

$$\underline{\underline{\sin \theta_i = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / n_0}}$$

או, ע"י ביטוי באמצעות ה-NA:

$$n_0 \sin \theta_{\max} \equiv NA$$

$$\underline{\underline{NA = n_0 \sin \theta_{\max} = n_0 \sin \theta_i = n_0 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / n_0 \approx n_1 (2\Delta)^{1/2}}}$$

where,

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \text{ and } n_1 \approx n_2$$

מהגבל על זווית הכניסה לסיב ניתן להבין שיכולות להיות מגוון זוויות אפשריות, כאשר קרניים עם זוויות שונות למעשה ישהו זמן שונה בתוך הסיב (כי המסלול האופטי שלהם יהיה שונה). המשמעות של האמור לעיל שאימפולס המסודר בכניסה לסיב יתרחב ביציאה מהסיב. ניתן לתאר את התרחבות האימפולס בזמן לפי המשוואה הבאה:

$$\Delta T = n_1 / c (L / \sin \phi_c - L) = Ln_1^2 \Delta / cn_2$$

סדר גודל להגבל על קצב שידור הביטים ניתן לפי התרחבות הפולס (וזמן שאורך ביט אחד). מקובל לתאר את ההגבל הזו לפי גודל המכונה מכפלת קצב שידור הביטים במרחק (bit rate-distance product):

$$B = 1/T_B < 1/\Delta T$$

$$B\Delta T < 1$$

$$BLn_1^2\Delta/cn_2 < 1$$

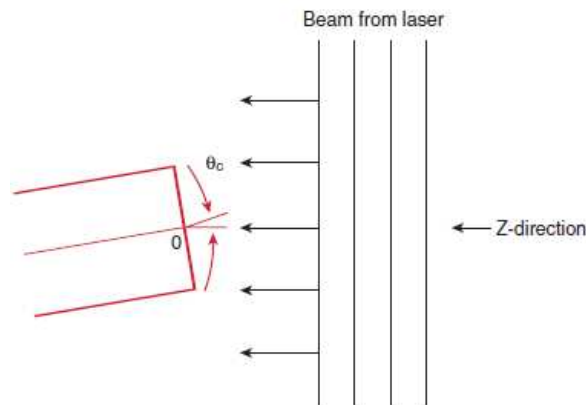
$$\underline{BL < cn_2/n_1^2\Delta}$$

כאשר התנאי הזה לא נשמר מתקיימת תופעה המכונה דיספרסיה בין אופנית (Intermodal dispersion).

בסיבי GRIN גודל זה מפותח קצת אחרת והוא ניתן ע"י הנוסחא (הנוסחא ל-NA היא זהה לחלוטין):

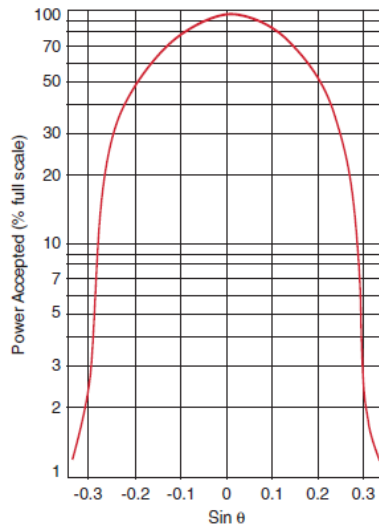
$$\underline{BL < 8c/n_1\Delta^2}$$

באופן מעשי ה-NA של סיבים אופטיים המשמשים לתקשורת הינו 0.2-0.3 עבור סיבי MMF (GRIN או STEP INDEX) ו-0.1-0.3 עבור סיבי SMF. האופן שבו אנו נמדוד את ה-NA של סיב MMF מסוג GRIN מתואר באיור 3.5. באיור ניתן לראות שהשדה האופטי הפוגע בסיב הוא בקרוב בעל חזית גל משורית (למעשה השדה הינו בעל חזית גל כדורית אבל מכיוון שקוטר כתם האור של אלומת הלייזר (1 מ"מ) גדול בהרבה מקוטר הסיב (100 מיקרומטר) הרי שניתן להניח שהשדה הוא בעל חזית גל מישורית). הזווית θ_c היא זווית הפגיעה של הקרן מהלייזר ביחס לציר האורכי של הסיב, זווית זו היא למעשה הזווית $\theta_i = \theta_c$ שבנוסחאות שלעיל. ע"י סיבוב קצה הסיב ביחס לציר סיבוב (הנקודה O) ניתן למצוא את הזווית שעבורה מפסיקות הקרניים להיתמך בסיב – היא הזווית המרבית שהסיב יכול לקבל, ע"י מציאת הזווית הזו נוכל לחשב בנקל את ה-NA של הסיב.



איור 3.5- מדידת ה-NA של סיב אופטי

איור 3.6 מראה את האופיין שמתקבל כאשר מודדים את עצמת האור שנאספת בסיב כפונקציה של זווית הסיבוב של קצה הסיב. באופן מעשי, מקובל להגדיר את ה-NA של הסיב כאשר העצמה של האופיין מגיע ל-5% מהערך המרבי שלו. שים לב שבאופיין מודדים את העצמה ע"י סיבוב קצה הסיב לשני כיוונים ומיקום הערך המרבי במרכז (כלומר, זווית אפס היא הזווית בה הערך מרבי).



איור 3.6 – אופיין ה-NA של סיב אופטי מסוג GRIN

3.5 הפסדי הספק

אחד הפרמטרים החשובים ביותר בסיבים אופטיים הוא הנחות ליחידת אורך. פרמטר זה יגביל את מרחק השידור ויכפה דרישות על המשדרים ועל המקבלים שבמערכת התקשורת. ישנם מספר מנגנונים שבהם ניתן להפסיד אנרגיה בסיב. באופן כללי הפסדי האנרגיה בסיב ניתנים לפי חוק Beer Lambert הקובע שהפסד ההספק (השינוי בהספק) בנקודה מסוימת בתווך הוא פרופורציוני לכמות ההספק

$$dP/dz = -\alpha P \quad \text{בנקודה:}$$

$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z)$$

עבור סיב באורך מסוים L פרמטר ההפסדים של הסיב יינתן ביחידות של dB/km :

$$\alpha = -\frac{10}{L} \cdot \log_{10} \left(\frac{P(L)}{P_0} \right), [\alpha] = \text{dB/km}$$

כאשר, אלפא מכילה בתוכה את כל ההפסדים, הן מפוזר והן מבליעה (הגבול התיאורטי המינימאלי של הפרמטר הזה בסיבי סיליקה הוא 0.16 די בי לק"מ. באופן מעשי עבור סיבי SMF הנחות הוא בערך 0.2 dB/km ועבור סיבי MMF 1 dB/km). השיטה הפשוטה ביותר למדוד את מקדם ההפסדים היא באופן הבא: א. משדרים אור CW לתוך סיב בעל אורך L, ב. מודדים את עצמת האור בקצה הרחוק של הסיב (Pr), ג. חותכים את הסיב קרוב ככל האפשר למשדר (כלומר משאירים רק קטע קטן מהסיב, באופן מעשי מספיק להשאיר 1 מטר), ד. מודדים את העצמה שוב בקצה הסיב הקצר שנותר (P0). באופן זה ניתן לקזז את הפסדי ההספק שמתקבלים בצימוד הלייזר לסיב ולקבל את ההפסדים נטו מהסיב עצמו. מקדם ההפסדים יחושב לפי:

$$L \gg 1m$$

$$\alpha \approx -\frac{10}{L} \cdot \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_0} \right)$$

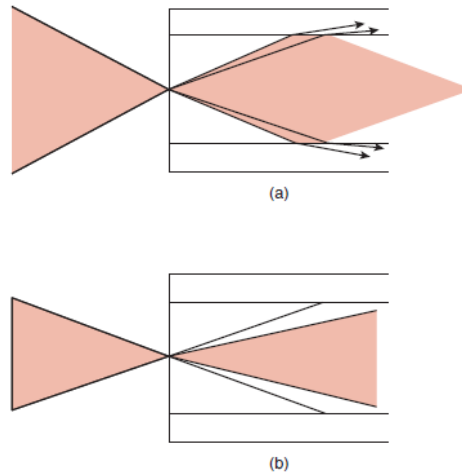
לעיתים קרובות מגדירים את ההספק בסיב במונחים של dBm לפי ההגדרה:

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{mW}}{1mW} \right),$$

הגדרה זו מסייעת בחישובים של הפסדים במערכת התקשורת. כך למשל, אם ידוע ההספק של משדר ב- dBm וכן ידועים ההספדים בדרך (הן מנחות בסיב והן מהפסדי צימוד שונים) ביחידות של dB ניתן להפחית את ההפסדים מההספק ולקבל את ההספק במוצא ב- dBm. כלומר, ניתן לקזז ולהוסיף הפסדים ב-dB מהספקים ב-dBm ולקבל את ההספקים במוצא ב-dBm - זכור!

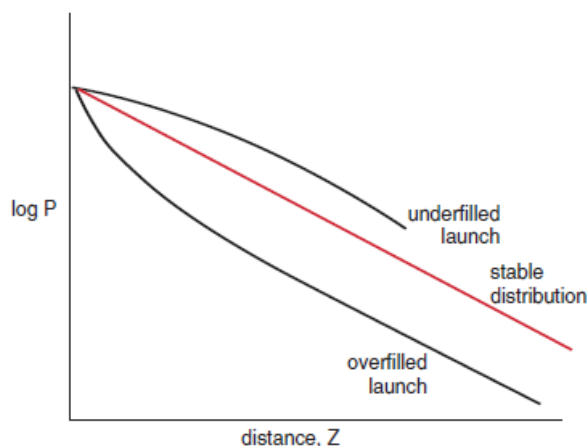
3.7 – בעיה מעשית במעבדה

בד"כ בעבודה במעבדה לא משתמשים בסיבים ארוכים כפי שמשתמשים ברשתות הפרוסות בשטח. במצב שבו הסיב איננו מספיק ארוך תוצאות הבדיקה של הנחות עלולות להיות מטעות. רוצה לומר, הנחות שיימדד בניסוי יהיה תלוי באופן הצימוד של האות לסיב. באיור 3.7 מופיעות שתי צורות בהן אור מצומד לסיב – אחת מכונה underfilled והשנייה overfilled.



איור 3.7- צימוד יתר a וצימוד חסר b

בצימוד חסר הזוויות של הקרניים קטנות יותר (הזווית עם ציר של הסיב) מה שגורם להפסדים קטנים יותר, ואילו בצימוד יתר הזוויות של הקרניים עם ציר הסיב גדולות יותר, מה שגורם להפסדים גדולים יותר. על מנת לדמות את המצב הממשי בשטח נעזרים בהתקן המכונה Mode Scrambling. זהו התקן שיוצר צימוד של שני המצבים וגורם לקיומם של הקרניים שנתמכות ע"י הסיב (ע"פ ה-NA של הסיב) ללא קשר לאופן הצימוד. איור 3.8 מראה את התלות של הפסדים בסיב כאשר יש צימוד חסר, צימוד יתר ובשימוש ב- Mode Scrambling. בניסוי אנחנו נעזר בהתקן זה (בעת הצורך) כדי לדמות את תנאי השטח ולנטרל את התלות בצימוד האור.



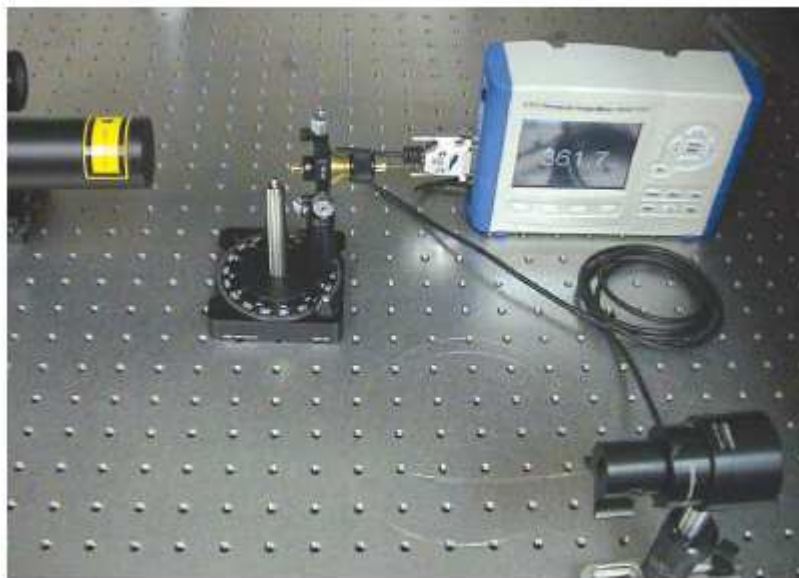
איור 3.8- הפסדים בצימוד חסר, צימוד יתר ובשימוש ב- MS

3.8 מהלך הניסוי

בשלב ראשון נמדוד את ה-NA של סיב MMF מסוג GRIN מתוצרת של NewPort (F-MLD). בניסוי זה הינך משתמש בציוד הבא (הוצא את הציוד מהערכה והנח על פני השולחן האופטי):

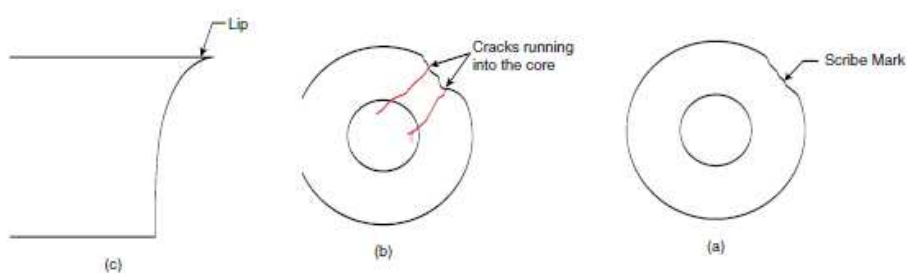
Catalog Model#	Description	Qty.	Cat#	Description	Qty.
F-MLD	100/140 MM Fiber, 50 meters	1	F-MLD-500	100/140 μ m Fiber, 500 m	1
R-30025	1.5 mW HeNe Laser	1			
ULM-TILT	Laser Mount	1	F-916	Fiber Coupler (without lens)	1
340-RC	Rod Clamp	1	FPH-S	Fiber Chuck	1
41	Short Rod	1	M-20X	20X Objective Lens	1
F-CL1	Fiber Cleaver	1			
F-STR-175	Fiber Stripper	1			
FK-BLX	Allen Wrench Set	1			
SK-25A	Screw Kit, 1/4-20	1			
SK-08A	Screw Kit, 8-32	1			
RSP-2T	Rotation Stage, 2"	1			
VPH-2	Post Holder, 2"	1			
SPV-2	Post, 2"	1			
SPV-3	Post, 3"	1			
MPH-2	Micro-Series Holder, 2"	1			
MSP-2	Micro-Series Post, 2"	1			
FP-1A	Fiber Positioner	2			
818-FA2	Bare Fiber Holder Mount	1			
FP3-FH1	Bare Fiber Holder	1	FM-1	Mode Scrambler	1
1918-C	Power Meter	1			
918D-SL-OD3	Low Power Detector, Silicon	1			
B-1A	Sliding Base	1			
423	Translation Stage	1			
SM-13	Micrometer, 13 mm	1			
IMIC-1	Inspection Microscope	1			
FPH-S	Fiber Chuck	2			
RSA-2TI	Solid Insert (Included in RSP-2T)	1			
TA-8Q20-10	Thread Adapter	1			

Additional equipment required: microscope slide cover glass.



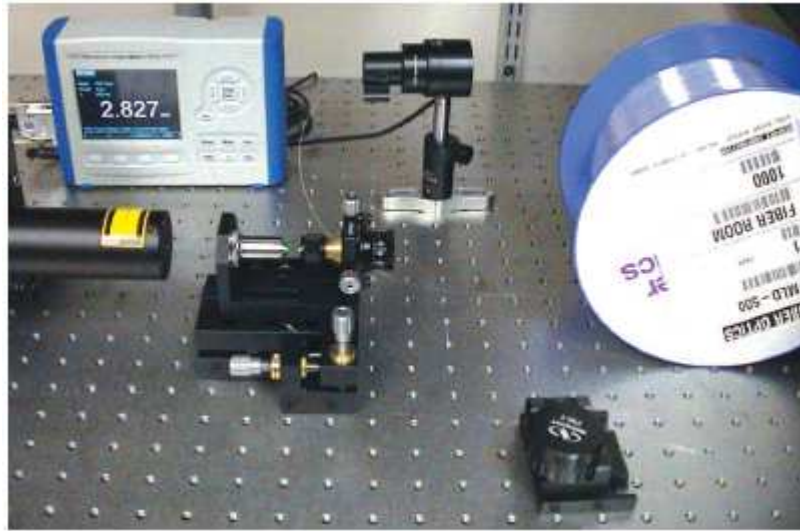
איור 3.9 – מערכת האופטית למדידה ה-NA של הסיב

1. חתוך 2 מ' של סיב אופטי מסוג F-MLD (השתמש בסליל של ה-50 מטר ולא של ה-500 מטר) וגלף את המעטפת של הסיב באמצעות המגלפת F-STR-175, קטע של 3 ס"מ מקצה הסיב.
2. השתמש ב-F-CL1 לצורך חיתוך משורי של פני השטח של הסיב. הנח את המגלפת על השולחן האופטי כאשר הסכין פונה כלפי מעלה, העבר את הסיב על פני התער תוך כדי שאתה מושך את שני קצוות הסיב בכיוונים מנוגדים.
3. בחן את טיב החיתוך שבצעת באמצעות המיקרוסקופ IMIC-1 (האר צד אחד של הסיב באמצעות אור לבן). באיור שלהלן מופיעה דוגמא לחיתוך טוב, a, ושני מקרים של חיתוך גרוע b-c:



4. הרכב את הלייזר HeNe 2 mW (הפעל את הלייזר ותן לו להתחמם, שים לב שמפתח הלייזר סגור!). כעת חבר את מסד הלייזר, ULM-TILT לתופסן מוט הלייזר 340-RC Clamp. הצב את מוט הלייזר על במת הזזה 423 וחבר עליו את התופסן. כוון את הלייזר כך שהוא מקביל לשורה של חורי הברגים שבשולחן האופטי. העזר בערכת הברגים שברשותך. (ראה איור 3.9).

5. מקם את הרכיב RSP-2T (במה מסתובבת) כך שמרכזה עובר בקו אלומת הלייזר, דבר זה יכול להעשות ע"י הזזת במת הזזה 423. הצב במרכז הבמה את הרכיב MPH-2 ובתוכו את הרכיב MSP-2.
6. הצב את הסיב שגילפת בתוך הרכיב FPH-S, הקפד ש - 3 ה-ס"מ המגולפים מקצה הסיב מונחים בתוך הרכיב. הכנס את הרכיב לתוך ה- FP-1A. חבר את ה- FP-1A אל הרכיב SPV-2 והתקן אותם על הבמה המסתובבת באמצעות הרכיב VPH-2. כוון את קצה הסיב כך שהוא נמצא מעל למרכז הבמה המסתובבת – זה שלב קריטי למדי, דייק!
7. שחק עם הבמה ובדוק שקצה הסיב נמצא כל הזמן מעל מרכז הבמה – שלב זה חשוב למדי.
8. התקן את הקצה הרחוק של הסיב בתוך הרכיב FP3-FH1, כמו כן חבר את הרכיב 818-FA2 על הגלאי 918D-SL-OD3 ולאחר מכן התקן את תופסן הסיב FP3-FH1 על הגלאי. אפס את הגלאי ע"י חסימת האור מהלייזר.
9. כוון את הגלאי לאורך הגל המתאים ומדוד את ההספק במוצא הסיב כפונקציה של זווית הפגיעה של הלייזר. עשה זאת ע"י סיבוב הבמה במעלה ומדידת העצמה. זווית של 20-30 מעלות צריכה להתקבל בין שני הערכים המינימאליים. הספק שיא של 40 מיקרוואט נחשב טוב מאוד עבור שלב זה.
10. בדו"ח יהיה עליך לצייר גרף של העצמה שקיבלת (מנורמלת לערך מרבי) כפונקציה של סינוס הזווית, לכן עליך לבצע רישום מדויק. כמו כן, יהיה עליך לקבוע את ה-NA של הסיב ע"פ קריטריון 5% שניתן בהקדמה לניסוי זה. בנוסף יהיה עליך לבצע השוואה עם האיור הנתון בהקדמה ולהסביר את הסיבות (אם יש כאלה) לסטיות בין שני הגרפים.
11. כעת נמדוד את ההספדים ליחידת אורך שקיימים בסיב. לצורך כך, הוצא את הרכיב FPH-S מתוך הרכיב FP-1A. הוצא את הסיב מהרכיב והנח בצד. הזז את הבמה המסתובבת מקו אלומת הלייזר.
12. התקן את הרכיב F-916 בקו אלומת הלייזר. קח את הסיב הארוך F-MLS 500 וגלף את קצה הסיב כפי שעשית עבור הסיב הקצר בתחילת הניסוי.
13. התקן את הסיב בתוך הרכיב FPH-S והשחל לתוך הרכיב FP-1A שנמצא על הרכיב F-916. (ראה איור 3.10).



איור 3.10- המערכת האופטית למדידת הנחות בסיב

14. התקן את העדשה M-20X על הרכיב F-916 .
15. גלף את הצד הרחוק של הסיב האופטי הארוך (F-MLD 500) וצמד אותו לגלאי האופטי (כפי שעשית מוקדם יותר עם הסיב הקצר).
16. מקם את קצה הסיב שמצומד ללייזר כך שהוא מרוחק כ-2 מ"מ מקצה העדשה. כוונן את קצה הסיב באמצעות הברגים שנמצאים על הרכיב FP-1A תוך כדי שאתה צופה בעצמה שמתקבלת בגלאי. עליך להגיע לקריאה של לפחות ל-1 mW בגלאי.
17. הלבש את ה- Mode Scrambler על הסיב האופטי, במקום נוח בקרבת הלייזר. מאחר ואלומת הלייזר היא צרה למדי, הקרניים שפוגעות בעדשה הן בקרוב טוב מקבילות לציר ההתפשטות של האלומה. לכן, בקרוב טוב, הקרניים שמגיעות לסיב תהיינה בעלות זוויות (הקרניים ממוקדות למוקד העדשה ע"י העדשה) שממלאות את ה-NA של העדשה. ה-NA של העדשה איננו זהה ל-NA של הסיב, כך שהסיב יכול להיות במיקוד חסר או במיקוד יתר (ראה את ההסברים במבוא לניסוי זה). ע"י שימוש ב- MS נוכל לגרום רק לאופנים הנתמכים בסיב להתפשט בסיב (זהו מצב המדמה את המצב שיש בשטח כאשר יש סיב מספיק ארוך). הוצא את הקצה הרחוק של הסיב מהגלאי והאר אותו על נייר לבן. בחן את השפעת ה-MS על כתם האור היוצא מהסיב. כאשר הכתם הוא מינימאלי זהו המצב היציב.
18. הכנס שוב את הסיב לגלאי ומדוד את ההספק בקצה הרחוק של הסיב. רשום את אורך הסיב שרשום על התוף – דבר זה חיוני לכתיבת הדו"ח!
19. חתוך את הסיב כ-2 מטר מהקצה הקרוב של הסיב. צמד את הקצה של הסיב שוב לגלאי ומדוד את ההספק. ציין על התוף את האורך החדש של הסיב (כלומר החסר את 2 המטרים שחתכת).

20. על סמך שתי המדידות הללו עליך להיות מסוגל לחשב את הנחות ליחידת אורך שיש בסיב. הערך שקיבלת (צריך לקבל בערך 7 dB/km) הינו גדול יותר מהערך הנקוב של הסיב ($\sim 3 \text{ dB/km}$). מה יכולה להיות הסיבה לכך לדעתך (רמז: שים לב לאורך הגל שעבורו מתוכנן הסיב)? הסבר בדו"ח.

3.9 שאלות הכנה

1. נתון סיב אופטי עם מעטה (cladding) בקוטר של 125 מיקרומטר ומאמץ מתיחה לשבר של 340 MPa . מהו הכוח (במתיחה) שיש להפעיל על הסיב כדי שיקרע (ב-kgf)? מבצעים חתך קטן בסיב כך שקוטרו האפקטיבי קטן ב-10%, פי כמה קטן/גדל/לא משתנה מאמץ המתיחה לשבר? והכוח?
2. נתון סיב אופטי בעל מעטה (cladding) בקוטר של 140 מיקרומטר, מהו רדיוס הכיפוף המרבי אם ידוע שהמעוות המרבי המותר לתפקודו התקין של הסיב הוא 1%?
3. נתון סיב מסוג Step Index עם מקדם שבירה בליבה של 1.46 ומקדם שבירה במעטה של 1.47. מהו המפתח הנומרי של הסיב (NA)?
4. נתון סיב GRIN עם מקדם שבירה מרבי של 1.46 ומקדם שבירה מזערי של 1.45, מהו המפתח הנומרי של הסיב (NA)?
5. נתון סיב GRIN באורך של 10 ק"מ עם NA של 0.3 ומקדם שבירה מרבי של 1.46. מהו קצב העברת המידע המרבי בסיב? כיצד תשתנה תשובתך אילו היה מדובר בסיב מסוג Step Index?
6. כאשר מבצעים חיתוך לא טוב בקצה הסיב, עשויים להופיע סדקים במעטה ובליבה של הסיב. מדוע לדעתך סדקים אלה אינם רצויים? מדוע חיתוך שמשאיר שפה (Lip) איננו רצוי לדעתך?
7. נתון מערכת תקשורת הכוללת משדר 2 mW , מקלט עם רגישות מינימאלית של $1 \mu\text{W}$ וסיב אופטי עם מקדם הפסדים של 1 dB/km . יעילות הצימוד של המשדר והמקלט לסיב היא 50%. מצא את אורך הסיב המרבי שניתן לעבוד בו.
8. בטא את ההספקים הבאים ביחידות של dBm: 1 W , 1 mW , $1 \mu\text{W}$, 1 nW .
9. משדרים אור לסיב אופטי כך שצימוד האור לסיב הוא צימוד חסר (underfilled). בוחנים את כתם האור שיוצא מצידו הרחוק של הסיב. כעת חוזרים על הניסוי כאשר משתמשים ב- Mode Scrambling. האם כתם האור קטן או גדל ביחס למצב הראשון? איך הייתה משתנה תשובתך אילו הצימוד היה צימוד יתר (overfilled)?

ניסוי 4 – סיב חד אופן SMF, צימוד לייזר לסיב חד אופן ומדידת פרופיל

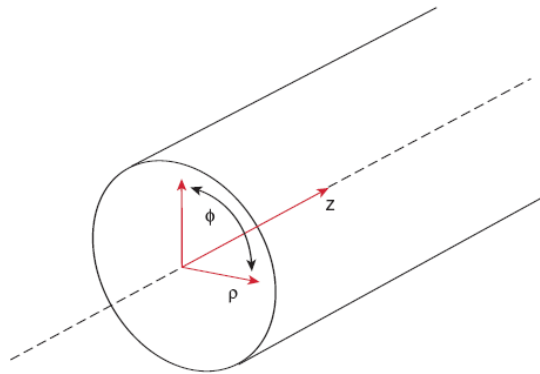
העצמה של האופן היסודי

4.1 – הקדמה

בניסוי זה נלמד על המודל האופנים של סיבים אופטיים. בנוסף לכך, נלמדים העקרונות לקבלת אופן יחיד בסיב וצימוד יעיל של לייזר HeNe לסיב. לבסוף נמדד פרופיל העצמה של האופן היסודי.

4.2 – תזכורת למודל האופנים בסיבים אופטיים

מודל הקרניים שניתן עבור תאור סיבים מרובי אופנים איננו מודל מדויק של התפשטות השדה בסיב, אלא הוא תאור פשטני של התקדמות הפוטונים בסיב. על מנת לתאר במדויק את התפשטות השדה האופטי בסיב עלינו לפתור במדויק את משוואות הגלים של מקסוואל (Maxwell) בקואורדינטות גליליות עבור הבעיה הפיסיקאלית (ראה איור 4.1). נביא להלן את העקרונות בפתרון הבעיה (לא פיתוח מלא!).



איור 4.1 – קואורדינטות גליליות של סיב אופטי

בהנחת חומר איזוטרופי, לא מוליך וחסר בליעה משוואות הגלים, תלוית המרחב-זמן, המבוססת על משוואות מקסוואל הינה מהצורה:

$$\nabla^2 E(r,t) + n^2 k_0^2 E(r,t) = 0$$

באופן דומה, משוואת הגלים תלוית המרחב תדר מתקבלת ע"י התמרת פורייה של המשוואה:

$$\nabla^2 \tilde{E}(r, \omega) + n^2(\omega) k_0^2 \tilde{E}(r, \omega) = 0$$

$$k_0 = \omega / c = 2\pi\nu / c = 2\pi / \lambda$$

Where

$$\tilde{E}(r, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(r, t) \exp(i\omega t) dt$$

כל הפתרונות האפשריים למשוואה שלעיל (המשוואה תלוית התדר והמרחב), השומרים על הפיזור המרחבי שלהם לאורך הסיב ואשר מקיימים את תנאי השפה של הבעיה, נקראים אופנים (Modes). תנאי

השפה של הבעיה הם: א. השדה האופטי הוא אפס באין סוף (כלומר במרחק אינסופי ממרכז הסיב בכיוון ציר r), ב. השדה האופטי הוא סופי במרכז הסיב ו- ג. השדה (מגנטי וחשמלי, עבור כל שלושת הרכיבים ברכיב המשיקי) הוא רציף במעבר מתווך אחד לתווך שני (core-cladding interface). תנאי נוסף המאפשר את הפתרון הלא טריוויאלי של המערכת הוא שהטרמיננטה של מטריצת המקדמים של אוסף המשוואות שמתקבלות תהא שונה מאפס.

הפתרונות הרבים שמתקבלים מובדלים זה מזה ע"י קבוע המכונה קבוע ההתפשטות (propagation constant) β . כל פתרון מסומן ע"י צמד האותיות HE_{mn} או EH_{mn} בהתאם לאם השדה החשמלי או השדה המגנטי הוא הדומיננטי בכיוון הקואורדינטה z . עבור כל פתרון מתקבל קבוע התפשטות בעל ערך שונה $\beta_{mn} = \bar{n} k_0$, כאשר $n_2 < \bar{n} < n_1$ ו- $\bar{n}$ מכונה Mode Index.

פרמטר חשוב מאוד הקובע מתי אופן מסויים מפסיק להתקיים הוא V parameter והוא ניתן לפי:

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx (2\pi / \lambda) a n_1 \sqrt{2\Delta} = k_0 a n_1 \sqrt{2\Delta} = k_0 a NA$$

בנוסף לכך, ניתן להגדיר פרמטר נוסף המכונה פרמטר ההתפשטות המנורמל (Normalized Propagation Constant):

$$b = \frac{\beta/k_0 - n_2}{n_1 - n_2} = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2}$$

שני הפרמטרים האלה שימושיים מאוד כדי לקבוע באופן גרפי הן את גודל קבוע ההתפשטות והן מתי אופן מפסיק להתקיים בסיב. אפשר להראות, הן גרפית והן אנליטית שעבור $V < 2.405$ האופן היחידי שניתן ע"י הסיב הוא האופן HE_{11} – זהו בדיוק התנאי לסיב בעל אופן יחיד (SMF)! – ראה איור 4.2.

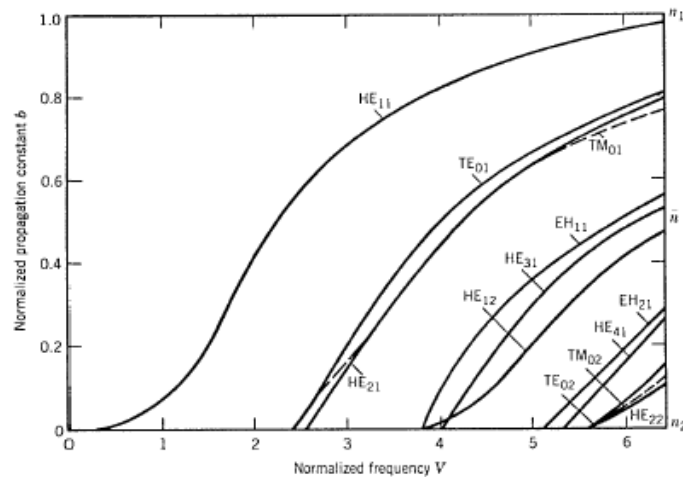


Figure 2.5: Normalized propagation constant b as a function of normalized frequency V for a few low-order fiber modes. The right scale shows the mode index $\bar{n}$. (After Ref. [34]; ©1981 Academic Press; reprinted with permission.)

איור 4.2 – קבוע התפשטות מנורמל (b) כנגד תדר מנורמל (V)

ניתן להראות שרכיב ה- z של השדה האופטי בכיוון z הוא קטן ביותר עבור האופן HE_{11} כך שניתן להתייחס אל השדה האופטי כמקוטב ליניארי. במקרה כזה ניתן לבחור את ציר הקיטוב להיות x ולקרב את פילוג השדה האופטי לפילוג גאוסיאני:

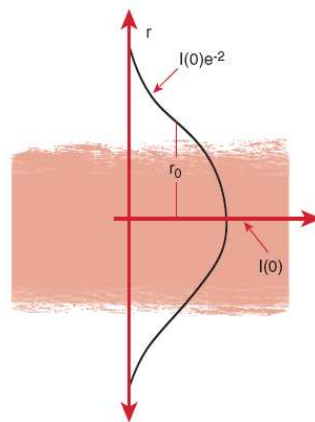
$$E_x = A \exp(-r^2 / w_0^2) \exp(-i\beta z)$$

כאשר w_0 הוא רדיוס הכתם של השדה האופטי (Spot Size) והוא מוגדר כרדיוס שבו עצמת השדה יורדת ל- $1/e$ מהעצמה (השדה) המרבית (במרכז הסיב). מאחר ועצמת הקרינה (הספק ליחידת שטח – irradiance) היא פרופורציונית לשדה לנורמה של השדה נקבל:

$$I(r) = \frac{1}{Z_0} |E_x|^2 = I_0 \exp(-2r^2 / w_0^2) = I_0 \exp(-r^2 / r_0^2)$$

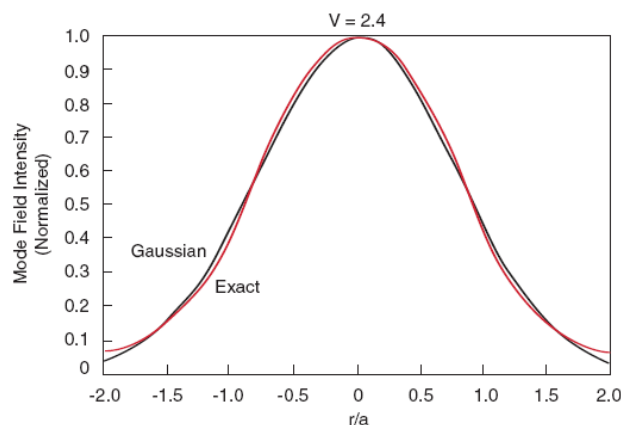
$$\underline{\underline{I(r) = I(0) \exp(-r^2 / r_0^2)}}$$

כלומר, עצמת הקרינה היא בקרוב טוב בעלת פרופיל גאוסיאני (ראה איור 4.3).



איור 4.3 - פילוג העצמה בחתך הסיב

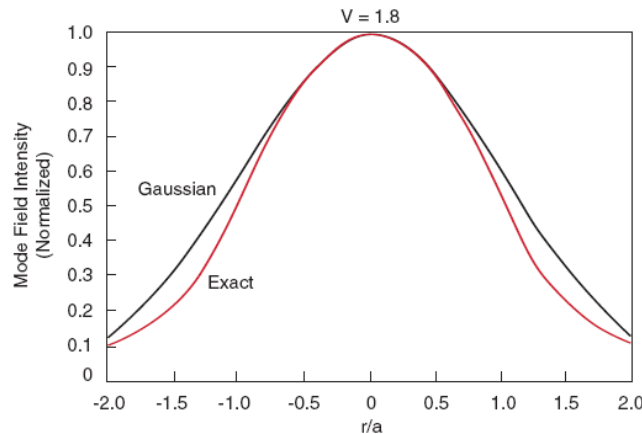
כאשר מבצעים את הניסוי בפועל ניתן לראות סטיות קלות בין פרופיל גאוסיאני לבין פרופיל העצמה הממשי שמתקבל, אבל כפי שניתן לראות באיור 4.4 אלה סטיות קטנות למדי:



איור 4.4 – השוואה בין פרופיל העצמה בניסוי לבין פרופיל העצמה הגאוסיאני עבור תדר מנורמל של $V=2.4$

כאשר קוטר הסיב מפסיק להיות גדול בהרבה מאורך הגל (כלומר כאשר יורדים לערכים קטנים מ- $V=2.4$ באופן משמעותי) פרופיל העצמה מתרחק מצורת הגאוסיאן, אם כי הוא עדיין בעל מאפיינים דומים (ראה איור 4.5). כפי שניתן לראות באיורים 4.4 ו-4.5, ככל שאורך הגל קרוב יותר לקוטר הסיב (כלומר V גדול יותר)

פרופיל העצמה של האופן היסודי קרוב יותר לפרופיל גאוסיאני. ניתן לראות מהאיורים שעצמת הקרינה באיור 4.5 איננה מוגבלת היטב לליבת הסיב, לעצמת איור 4.4 שם עצמת הקרינה מוגבלת יותר לליבת הסיב (זכור שליבת הסיב מסתיימת בנקודה $r/a=1$). לכן מהנדסים שמתכננים סיבים אופטיים חד אופנים דואגים לייצר את הסיב כך שה- V parameter קרוב ככל שניתן ל-2.405.

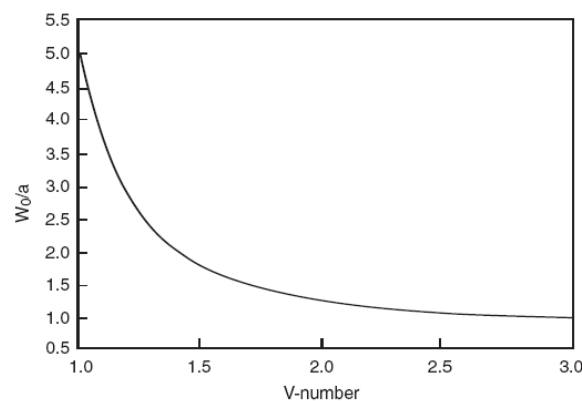


איור 4.5 – פרופיל העצמה כאשר אורך הגל איננו קטן בהרבה מקוטר הסיב ($V=1.8$)

בהינתן V של סיב אופטי, רדיוס הכתם האופטי ניתן לקביעה גרפית או ע"י משוואה אנליטית (בקירוב של 1% בתחום שבו $1.2 < V < 2.4$) לפי:

$$\underline{\underline{w_0 / a \approx 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}}}$$

או ע"י שימוש בגרף:



איור 4.6 – יחס רדיוס כתם האור לרדיוס הסיב בתלות בתדר המנורמל

כאשר מגדירים גודל נוסף המכונה שטח הליבה האפקטיבי לפי:

$$\underline{\underline{A_{eff} = \pi w_0^2}}$$

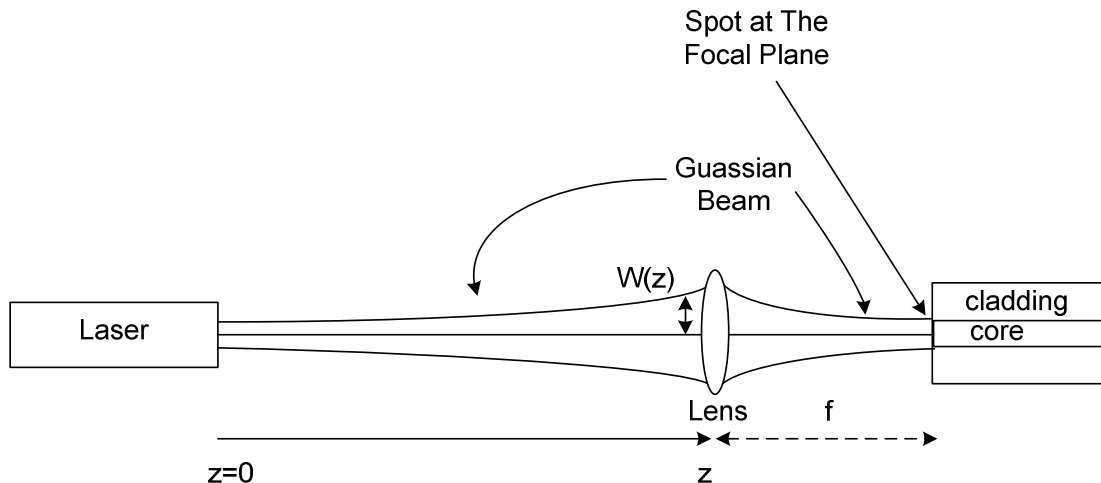
שבר האנרגיה המוחל בתוך הליבה ניתן לפי:

$$\Gamma = \frac{P_{core}}{P_{total}} = \frac{\int_0^a |E_x|^2 r dr}{\int_0^\infty |E_x|^2 r dr} = \frac{\int_0^a I(0) \exp(-r^2/r_0^2) r dr}{\int_0^\infty I(0) \exp(-r^2/r_0^2) r dr} = 1 - \exp\left(-\frac{a^2}{r_0^2}\right)$$

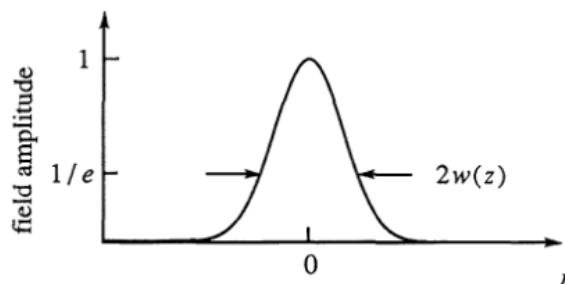
$$\underline{\underline{\Gamma = 1 - \exp(-a^2/r_0^2)}}$$

4.3 – צימוד של אלומת לייזר לסיב אופטי חד אופן

הצורה הממשית של אלומת לייזר איננה יכולה להיות מתוארת באופן מדויק ע"פ מודל הקרניים של אופטיקה גיאומטרית. כדי לקבל את פרופיל השדה של אלומה המתפשטת במרחב באופן מעשי יש לפתור את משוואת הגלים של מקסוואל עבור גלים כדוריים וע"י כך לקבל את פרופיל השדה במרחב ההתפשטות של הפוטונים (כפי שעשינו עבור סיבים, הדבר נעשה עבור חלל חופשי בו מתפשטת האלומה). התוצאה של פתרון המשוואות היא שלמעשה הן אלומה היוצאת מהלייזר והן אלומה היוצאת מעדשה הינן בעלות פרופיל גאוסיאני וצורה היפרבולית (ראה איור 4.7). למעשה חתך (פרוסה) בנקודה z מסוימת לאורך ציר ההתפשטות של האלומה תראה שפרופיל עצמת השדה (ולכן גם פרופיל עצמת הקרינה) הינם גאוסיאנים (ראה איור 4.7).



איור 4.7 – אלומה גאוסיאנית



איור 4.8 – פרופיל השדה בנקודה z מסוימת

להלן מספר משוואות המאפשרות להעריך את גודל כתם האור של האלומה היוצאת מהלייזר במרחק z מסוים, וכן את גודל כתם האור המתקבל במוקד העדשה:
 רדיוס כתם האור במרחק z מהלייזר ניתן ע"י הנוסחה (בכניסה לעדשה):

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\lambda z / \pi W_0^2 \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$d = 2W(z)$$

כאשר d זהו קוטר הכתם בכניסה ו- W_0 זה רדיוס אלומת הלייזר במוצא הלייזר. גודל כתם האור המתקבל במוקד של עדשה ניתן לפי:

$$D = 4\lambda f / \pi d$$

כאשר f זהו מוקד העדשה ו- λ זהו אורך הגל. על מנת שצימוד הלייזר לסיב יהיה יעיל נדרוש שקוטר כתם האור במוקד העדשה יהיה שווה לקוטר כתם האור שמתקבל בסיב חד אופן, כלומר נדרוש:

$$2w_0 = D$$

נוכל לקיים דרישה זו ע"י משחק עם המרחק שבו אנו מציבים את הלייזר ביחס לעדשה המרכזת את האור לסיב אם ידוע לנו מראש רדיוס כתם האור של הלייזר במוצא. קוטר כתם האור במוצא הלייזר הינו 0.63 מ"מ.

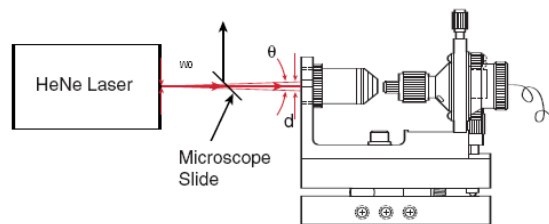
4.4 – מהלך הניסוי

בשלב הראשון של הניסוי נכוון את הלייזר לסיב SMF מתוצרת NewPort ולאחר מכן נמדוד את פילוג העצמה בקצה הרחוק שלו. הוצא את הרכיבים הבאים מערכת הניסויים:

Cat#	Description	Qty.
F-SV	4/125 SM at 633 nm fiber, 20 meters	20
R-30025	1.5 mW HeNe Laser	1
ULM-TILT	Laser Mount	1
340-RC	Clamp	1
41	Short Rod	1
F-916	Fiber Coupler (without lens)	1
FPH-S	Fiber Chuck	2
M-20X	20X Objective Lens	1
F-CL1	Fiber Cleaver	1
1918-C	Power Meter	1
918D-SL-OD3	Low Power Detector, Silicon	1
FK-BLX	Allen Wrench Set	1
SK-25A	Screw Kit, 1/4-20	1
SK-08A	Screw Kit, 8-32	1
RSP-1T	Rotation Stage, 1"	1
RSA-1TI	Solid insert (included in RSP-1T)	1
SPV-2	Post, 2"	1
SPV-3	Post, 3"	1
VPH-2	Post Holder, 2"	1
B-1A	Sliding Base	1
TA-8Q20-10	Thread Adapter	1
MPH-2	Micro Series Holder, 2"	1
MSP-2	Micro Series Post, 2"	1
F-STR-175	Fiber Stripper	1
IMIC-1	Fiber Inspection Microscope	1
FP-1A	Fiber Positioner	1

Additional equipment required: Razor blades, microscope cover glass, and tape to construct the slit mask for the power meter detector.

1. בעזרת הנוסחא לחישוב הפרמטר V וודא שערכו של התדר המנורמל הוא 2.19, עבור אורך הגל של הלייזר 633 ננומטר, קוטר סיב של 4 מיקרומטר ו-NA של 0.11.
2. מצא את ערך כתם האור בסיב על בסיס הפרמטר V שמצאת ורדיוס הסיב a (השתמש בנוסחא האמפירית שניתנה במבוא).
3. אורך המוקד של העדשה שברשותך הינו $f=8.3$ מ"מ ואילו קוטר אלומת הלייזר במוצא הלייזר הוא 0.63 מ"מ. ע"י הדרישה שקוטר כתם האור במבוא לסיב יהיה זהה לקוטר האלומה במוקד העדשה, חשב את המרחק שיש למקם את הלייזר ביחס לעדשה. דווח למדריך על ממצאך.
4. התקן את עדשת המיקרוסקופ שברשותך M-20X על הרכיב F-916 וכוון את הלייזר לעדשה (ראה איור). מקם את הלייזר והעדשה בשני קצוות ה-Breadboard (זהו איננו הערך המדויק אבל הוא מספק).

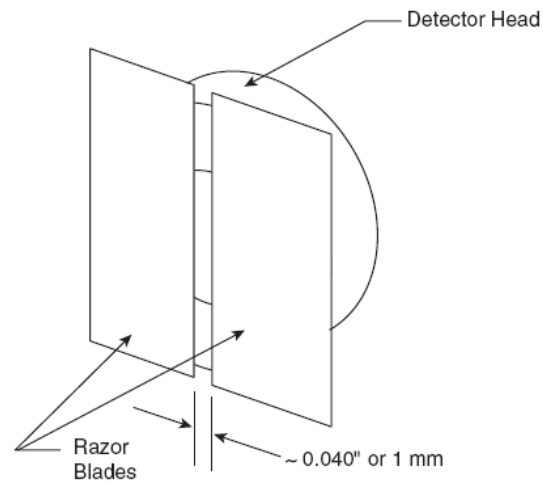


5. חתוך כ-2 מ' סיב מסוג F-SV ובצע חיתוך טוב בשני הקצוות של הסיב, כפי שעשית בניסויים קודמים.
6. התקן קצה אחד של הסיב בתוך ה-FPH-S והשחל ל-FP-1A שנמצא על הרכיב F-916, כפי שנראה באיור שלעיל.
7. הבא את קצה הסיב כ-2 מ"מ מהמשטח האחורי של עדשת המיקרוסקופ שהתקנת. כוון באופן גס את קצה הסיב במרכז כתם האור.
8. התקן את הקצה הרחוק של הסיב בגלאי כפי שעשית בניסויים קודמים.
9. כוון את קצה הסיב בעזרת הרכיב FP-1A עד לצימוד מרבי תוך כדי שאתה צופה בעצמת הגלאי. צימוד טוב עבור מי שעורך את הניסוי בפעם הראשונה הוא כ-50 אחוז (3 dB) מעצמת הלייזר, דהיינו עליך לקבל בערך 1mW בגלאי (ניתן להסתפק ב-250 מיקרוואט).
10. נתק את הסיב מהגלאי והצב אותו בתוך הרכיב FPH-S. הרכב את הרכיב בתוך הרכיב FP-1A והצב אותם על הבמה המסתובבת RSP-1T. הקפד שקצה הסיב נמצא בדיוק במרכז הבמה! (ראה איור של המערכת האופטית). מקם את הבמה המסתובבת במרחק של 10 ס"מ מהגלאי.

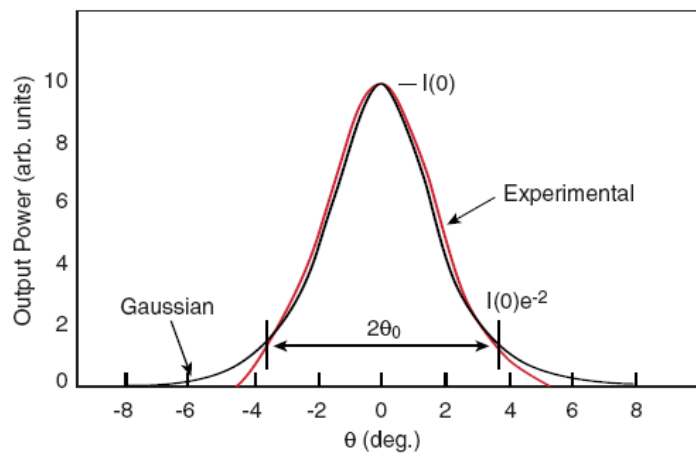


איור 4.9- מערך הניסוי

11. חסום את מפתח הגלאי באמצעות תער (ראה איור) או צמצם אופטי אחר (נייר כסף, לדוגמא).



12. סובב את קצה הסיב באמצעות הבמה המסתובבת ובכל חצי מעלה כך קריאה של הגלאי. התחל את המדידה מהנקודה שבה ההספק המופיע בגלאי הוא מינימאלי. בצע רישום מדויק של עצמת הקריאה בגלאי בכל זווית. אתה אמור לקבל קשת של ערכים בתווח של 15 מעלות מקצה לקצה. (ראה איור).

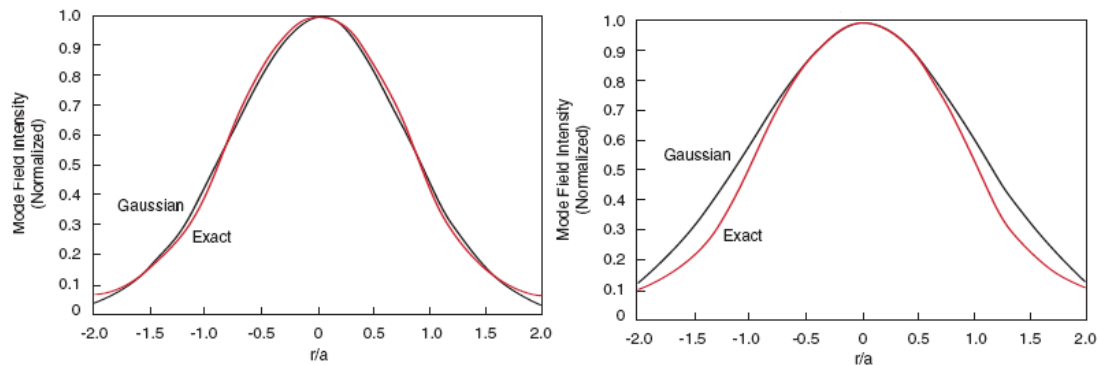


13. מדוד את הערך המרבי וציינו כ- $I(0)$. מדוד את הזווית שעבורה יורד ההספק ל- $1/e^2$ מערכו המרבי. ציין את הזווית הזו ב- θ_0 . החלף את הזווית θ_0 ב- r_0 ואת θ ב- r (ניתן לעשות זאת כיוון שיש קשר ליניארי, בקרוב, בין הזווית לרדיוס ($\theta L \approx r$)). L הוא המרחק עד לגלאי.
14. בדו"ח עליך להציג את התוצאות שקיבלת ואת הגאוסיאן המחושב על גרף אחד. כמו כן, חשב את שטח החתך האפקטיבי של הסיב ואת מקדם ההגבלים של הסיב (Γ Confinement Factor).

הערה: שים לב שבניסוי זה מדדת את פרופיל העצמה הרחק מקצה הסיב ולא בתוך הסיב ממש, אבל בין שתי המדידות הללו קיים פקטור קבוע ולכן מדידה בשדה הרחוק (הרחק מהסיב, למעשה השדה הרחוק מוגדר בנקודה $z_{far\ field} = (2a)^2 / \lambda$) כמו מדידה בחתך הסיב מבחינה איכותית.

4.5 – שאלות הכנה

- נתון סיב חד אופן עם רדיוס ליבה a ועם תדר מנורמל של $V=2.4$. מצא את המרחק ממרכז הסיב שבו עצמת הקרינה יורדת לחצי מערכה המרבי (r_{FWHM}), בטא את תשובתך במונחים של a . מהו שבר האנרגיה המוחל בתוך אזור זה?
- אורך הגל של הלייזר הוא 633 ננומטר ורדיוס הליבה של הסיב הוא 4 מיקרומטר, מה יכול להיות ה-NA המרבי של הסיב שיבטיח שרק אופן אחד ייתמך בסיב?
- נתון סיב בעל קוטר $2a$ ומפתח נומרי NA. באיזה מהמקרים הבאים אורך הגל המשודר לסיב גדול יותר (הגרף הימיני או השמאלי):



- נתון סיב חד אופן עם רדיוס של 4 מיקרומטר ופרמטר V של 2.405. הסיב מצומד ללייזר באורך גל של 633 ננומטר הממוקם במרחק של 50 ס"מ מעדשה מרכזת. מה צריך להיות אורך המוקד של העדשה על מנת לקבל צימוד יעיל של אלומת הלייזר.

ניסוי 5 – אופנים מסדר נמוך (SMF)

5.1 – הקדמה

בניסוי זה נתבונן על פילוג העצמה של מספר אופנים מסדר נמוך.

5.2 - אופנים בסיב עם פרמטר V מעט גדול יותר מ-2.405

כפי שראינו בניסוי הקודם על סיב חד אופן משוואת הגלים שיש לפתור כדי לקבל את האופנים הנתמכים

בסיב נתונה לפי:

$$\nabla^2 E(\vec{r}, \omega) + n^2(\omega) k_0^2 E(\vec{r}, \omega) = 0$$

$$k_0 = \omega / c = 2\pi\nu / c = 2\pi / \lambda$$

Where

$$E(\vec{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\vec{r}, t) \exp(i\omega t) dt$$

כאשר בקואורדינטות גליליות נקבל:

$$\nabla^2 E = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial E}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial E}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2}$$

with,

$$E(\vec{r}, \omega) = E_z(\omega) \hat{z} + E_\phi(\omega) \hat{\phi} + E_\rho(\omega) \hat{\rho}$$

hence,

1. $\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z(\omega)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 E_z(\omega)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z(\omega)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z(\omega)}{\partial z^2} + n^2(\omega) k_0^2 E_z(\omega) = 0$
2. $\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_\rho(\omega)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 E_\rho(\omega)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_\rho(\omega)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_\rho(\omega)}{\partial z^2} + n^2(\omega) k_0^2 E_\rho(\omega) = 0$
3. $\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_\phi(\omega)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 E_\phi(\omega)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_\phi(\omega)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_\phi(\omega)}{\partial z^2} + n^2(\omega) k_0^2 E_\phi(\omega) = 0$

מאחר וניתן לקשור בין שלושת רכיבי הווקטור חשמלי, הרי שמספיק לפתור משוואה אחת מהשלושה

ובאמצעותה לקבל את שני הרכיבים האחרים של השדה. נרצה לפתור את משוואה 1:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z(\omega)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 E_z(\omega)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z(\omega)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z(\omega)}{\partial z^2} + n^2(\omega) k_0^2 E_z(\omega) = 0$$

with Step Index Fiber :

$$n = \begin{cases} n_1, & \rho \leq a \\ n_2, & \rho > a \end{cases}$$

זוהי משוואה דיפרנציאלית חלקית מסדר שני, ננחש פתרון מהצורה:

$$E_z = F(\rho) \Phi(\phi) Z(z)$$

ע"י הצבה במשוואה נקבל שלוש משוואות פרידות(כל אחת מהפונקציות בפתרון תלויה רק בקואורדינטה אחת):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (F(\rho)\Phi(\phi)Z(z)) + \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} (F(\rho)\Phi(\phi)Z(z)) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} (F(\rho)\Phi(\phi)Z(z)) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (F(\rho)\Phi(\phi)Z(z)) + n^2(\omega)k_0^2 F(\rho)\Phi(\phi)Z(z) = 0$$

thus,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} \Phi(\phi)Z(z) + \frac{\partial^2 F(\rho)}{\partial \rho^2} \Phi(\phi)Z(z) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi(\phi)}{\partial \phi^2} F(\rho)Z(z) + \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} F(\rho)\Phi(\phi) + n^2(\omega)k_0^2 F(\rho)\Phi(\phi)Z(z) = 0$$

כעת נוסיף ונחסיר למשוואה את הפונקציות הבאות:

$$\beta^2 Z(z)F(\rho)\Phi(\phi) - \beta^2 Z(z)F(\rho)\Phi(\phi) = 0$$

and,

$$\frac{m^2}{\rho^2} \Phi(\phi)Z(z)F(\rho) - \frac{m^2}{\rho^2} \Phi(\phi)Z(z)F(\rho) = 0$$

ונקבל

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} \Phi(\phi)Z(z) + \frac{\partial^2 F(\rho)}{\partial \rho^2} \Phi(\phi)Z(z) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi(\phi)}{\partial \phi^2} F(\rho)Z(z) + \frac{m^2}{\rho^2} \Phi(\phi)Z(z)F(\rho) - \frac{m^2}{\rho^2} \Phi(\phi)Z(z)F(\rho) + \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} F(\rho)\Phi(\phi) + \beta^2 Z(z)F(\rho)\Phi(\phi) - \beta^2 Z(z)F(\rho)\Phi(\phi) + n^2(\omega)k_0^2 F(\rho)\Phi(\phi)Z(z) = 0$$

hence,

$$\left(\frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} + \beta^2 Z(z) \right) F(\rho)\Phi(\phi) = 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi(\phi)}{\partial \phi^2} + m^2 \Phi(\phi) \right) \frac{1}{\rho^2} Z(z)F(\rho) = 0$$

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 F(\rho)}{\partial \rho^2} + \left[n^2(\omega)k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right] F(\rho) \right) \Phi(\phi)Z(z) = 0$$

המהלך האחרון של הפרדת המשוואה לשלוש משוואות בלתי תלויות הוא חוקי, שכן כל אחד מהביטויים בסוגריים תלוי רק במשתנה אחד (שאיננו תלוי במשתנים האחרים) ולכן חובה על כל אחד מהביטויים שבסוגריים להתאפס באופן עצמאי. נקבל לכן,

$$\begin{aligned} \text{i. } & \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} + \beta^2 Z(z) = 0 \\ \text{ii } & \frac{\partial^2 \Phi(\phi)}{\partial \phi^2} + m^2 \Phi(\phi) = 0 \\ \text{iii } & \frac{1}{\rho} \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 F(\rho)}{\partial \rho^2} + \left[n^2(\omega) k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right] F(\rho) = 0 \end{aligned}$$

הפתרון של שתי המשוואות הראשונות (i-ii) הוא בהתאמה:

$$\begin{aligned} Z(z) &= \exp(i\beta z) \\ \Phi(\phi) &= \exp(im\phi), \quad m \in \text{integer} \end{aligned}$$

m חייב להיות שלם כיוון שהסימטריה של הסיב היא גלילית וכל 360 מעלות אנחנו חוזרים לאותה נקודה. לכן, אם הזווית היא $\phi = 2\pi$ אז על מנת לשמור על ערכים של Φ זהים לכל m (חוזרים לאותה נקודה כאשר $\phi = 2\pi$), m חייב להיות מספר שלם. β הוא כל מספר, אבל כפי שנראה בהמשך יש עליו מספר הגבלות.

את המשוואה האחרונה פותרים עבור שני מקרים שונים, מחוץ לליבה ותוך הליבה. כאשר הפתרון הוא

$$\text{בתוך הליבה אז מסמנים } p^2 = n_1^2(\omega) k_0^2 - \beta^2, \quad \rho \leq a \quad \text{and} \quad n = n_1$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 F(\rho)}{\partial \rho^2} + \left[p^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right] F(\rho) = 0$$

הפתרון למשוואה זו הוא קומבינציה ליניארית של שתי פונקציות בסל A ו-A' (הם קבועים):

$$F(\rho) = AJ_m(p\rho) + A'Y_m(p\rho)$$

עכשיו, נזכור שעל מנת שאופן ייתמך בסיב (כלומר אלומה של אור תתקדם באופן מסוים בתוך הסיב) על השדה להיות בעל ערך סופי במרכז הסיב ולשאוף לאפס באינסוף, מחוץ לסיב. כלומר, תחת התנאים:

$$1. \quad \rho \rightarrow 0, \quad E(\rho \rightarrow 0) \neq \infty, \text{ thus } F(\rho \rightarrow 0) \neq \infty$$

and

$$2. \quad \rho \rightarrow \infty, \quad E(\rho \rightarrow \infty) = 0, \text{ thus } F(\rho \rightarrow \infty) = 0$$

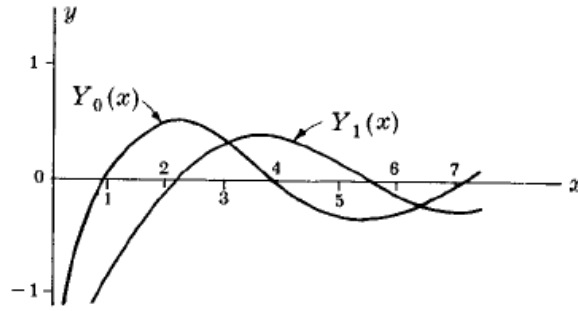
we get,

$$A' = 0$$

and thus,

$$F(\rho) = AJ_m(p\rho)$$

ראה את איור 5.1 עבור צורת פונקציה בסל Y, כיוון שעבור ערכים קרובים לאפס הפונקציה מתפוצצת המקדם A' חייב להיות אפס כדי לקיים את סופיות השדה במרכז הסיב!



איור 5.1 – פונקציות בסל מסוג Y

עבור המקרה השני שבו מתבוננים בשדה מחוץ לליבה נפתור שוב את המשוואה אם כי כעת נרשום:

$$-q^2 = n_2^2(\omega)k_0^2 - \beta^2, \quad \rho > a \quad \text{and} \quad n = n_2$$

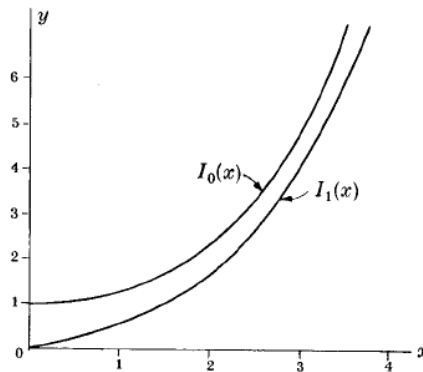
ולכן נקבל:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 F(\rho)}{\partial \rho^2} - \left[q^2 + \frac{m^2}{\rho^2} \right] F(\rho) = 0$$

הפתרון למשוואה זו הוא קומבינציה ליניארית של שתי פונקציות בסל (C ו-C' הם קבועים):

$$F(\rho) = CK_m(q\rho) + C'I_m(q\rho)$$

נזכור שהשדה חייב להיות אפס באינסוף. דרישה זו מחייבת את C' להיות אפס (ראה איור 5.2).



איור 5.2 – פונקציות בסל מסוג I

לכן נקבל עבור השדה מחוץ לליבה:

$$F(\rho) = CK_m(q\rho)$$

לסיכום נוכל כעת לרשום את הפתרון לרכיב השדה החשמלי בכיוון z :

$$E_z = \begin{cases} AJ_m(p\rho)\exp(im\phi)\exp(i\beta z) & \rho \leq a \\ CK_m(q\rho)\exp(im\phi)\exp(i\beta z) & \rho > a \end{cases}$$

$$p^2 = n_1^2(\omega)k_0^2 - \beta^2$$

$$q^2 = \beta^2 - n_2^2(\omega)k_0^2$$

מאחר ואת הטיפול שלעיל היה ניתן לעשות עבור השדה המגנטי ולא עבור השדה החשמלי (בדיוק באותו האופן,

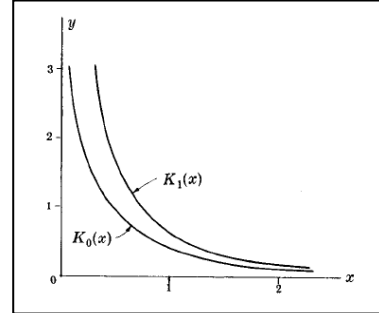
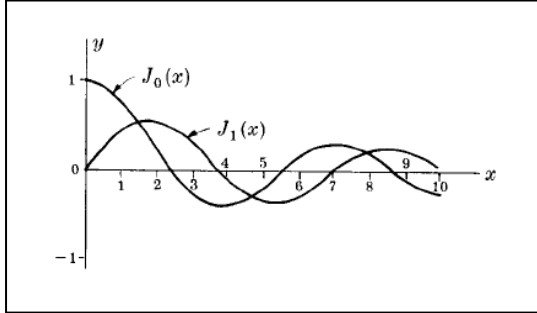
אחד לאחד) הרי שהשדה המגנטי בכיוון z יהיה בעל צורה זהה (למעט ערכי הקבועים), כלומר

$$H_z = \begin{cases} BJ_m(p\rho)\exp(im\phi)\exp(i\beta z) & \rho \leq a \\ DK_m(q\rho)\exp(im\phi)\exp(i\beta z) & \rho > a \end{cases}$$

$$p^2 = n_1^2(\omega)k_0^2 - \beta^2$$

$$q^2 = \beta^2 - n_2^2(\omega)k_0^2$$

על מנת לחוש את צורת השדה התבונן בצורתן של הפונקציות בסל מסוג J ו-K (איור 5.3):



איור 5.3 – פונקציות בסל מסוג J ו-K

על מנת לקבל את השדה החשמלי בסיב עלינו למצוא את שני הרכיבים הנוספים של השדה בכיוון האזימוטלי והרדיאלי. נתבונן במשוואת מקסוואל בתווך חסר מטענים:

$$\nabla \times E(\vec{r}, t) = -\frac{\partial B(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times E(\vec{r}, \omega) = -i\omega B(\vec{r}, \omega) = -i\omega\mu_0 H(\vec{r}, \omega)$$

and

$$\nabla \times H(\vec{r}, t) = \frac{\partial D(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times H(\vec{r}, \omega) = i\omega D(\vec{r}, \omega) = -i\omega\epsilon E(\vec{r}, \omega)$$

כלומר, נוכל לרשום באופן מלא את המכפלה הווקטורית ולהשוות בין הרכיבים:

$$\nabla \times E(\vec{r}, \omega) = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \frac{\partial E_\phi}{\partial z} \right) \hat{\rho} + \left(\frac{\partial E_\rho}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) \hat{\phi} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(\rho E_\phi)}{\partial \rho} - \frac{\partial E_\rho}{\partial \rho} \right) \hat{z}$$

$$= -i\omega\mu_0 H(\vec{r}, \omega) = -i\omega\mu_0 (H_\rho \hat{\rho} + H_\phi \hat{\phi} + H_z \hat{z})$$

and,

$$\nabla \times H(\vec{r}, \omega) = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} \right) \hat{\rho} + \left(\frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \hat{\phi} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(\rho H_\phi)}{\partial \rho} - \frac{\partial H_\rho}{\partial \rho} \right) \hat{z}$$

$$= -i\omega\epsilon E(\vec{r}, \omega) = -i\omega\epsilon (E_\rho \hat{\rho} + E_\phi \hat{\phi} + E_z \hat{z})$$

ע"י משחק עם המשוואות ניתן לבטא את כל אחד מרכיבי השדה המגנטי והחשמלי במונחים של רכיב ה-z באופן

הבא:

$$\begin{aligned}
E_\rho &= \frac{i}{p^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \mu_0 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \\
E_\phi &= \frac{i}{p^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \mu_0 \omega \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \\
H_\rho &= \frac{i}{p^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \varepsilon_0 n^2 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right) \\
H_\phi &= \frac{i}{p^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \varepsilon_0 n^2 \omega \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right)
\end{aligned}$$

באותו האופן ניתן לקבל סט זהה לחלוטין עבור רכיבי השדה מחוץ למעטה (רק כאן משתנה המקדם p ל-q):

$$\begin{aligned}
E_\rho &= \frac{i}{q^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \mu_0 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \\
E_\phi &= \frac{i}{q^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \mu_0 \omega \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \\
H_\rho &= \frac{i}{q^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \varepsilon_0 n^2 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right) \\
H_\phi &= \frac{i}{q^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \varepsilon_0 n^2 \omega \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right)
\end{aligned}$$

כפי שניתן לראות באמצעות הפתרון של E_z ו- H_z ניתן לקבל את כל הרכיבים של השדה מחוץ ובתוך לליבה של הסיב. נזכור שהפתרונות של E_z ו- H_z כוללים ארבעה מקדמים A, B, C and D שאינם ידועים. מקדמים אלה נקבעים ע"י דרישת רציפות הרכיבים המשיקים (המשוואות שלעיל) בנקודת המעבר בין הליבה למעטה. כלומר נדרוש:

$$\begin{aligned}
E_\rho(\rho=a) &= \frac{i}{q^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \mu_0 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \Big|_{\rho>a} = \frac{i}{p^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \mu_0 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \Big|_{\rho\leq a} \\
E_\phi(\rho=a) &= \frac{i}{q^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \mu_0 \omega \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho>a} = \frac{i}{p^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \mu_0 \omega \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho\leq a} \\
H_\rho(\rho=a) &= \frac{i}{q^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \varepsilon_0 n^2 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right) \Big|_{\rho>a} = \frac{i}{p^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \varepsilon_0 n^2 \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right) \Big|_{\rho\leq a} \\
H_\phi(\rho=a) &= \frac{i}{q^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \varepsilon_0 n^2 \omega \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho>a} = \frac{i}{p^2} \left(\frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \varepsilon_0 n^2 \omega \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho\leq a}
\end{aligned}$$

ע"י הצבת הפתרונות של E_z ו- H_z וסידור המשוואות, נקבל ארבע משוואות עם ארבע נעלמים. על מנת שיתקבל פתרון לא טריוויאלי עבור ארבעת המקדמים נדרוש שהדטרמיננטה של מטריצת המקדמים תתאפס. מדרישה זו מגיעה המשוואה הבאה:

$$(*) \quad \left[\frac{J'_m(pa)}{pJ_m(pa)} + \frac{K'_m(qa)}{qK_m(qa)} \right] \left[\frac{J'_m(pa)}{pJ_m(pa)} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{K'_m(qa)}{qK_m(qa)} \right] = \frac{m^2}{a^2} \left(\frac{1}{p^2} + \frac{1}{q^2} \right) \left(\frac{1}{p^2} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{1}{q^2} \right)$$

ע"י פתרון נומרי של המשוואה שלעיל, עבור כל ערך נתון של מקדמי השבירה n_1 ו- n_2 , מספר גל מסוים $k_0 = 2\pi/\lambda$ ורדיוס ליבה של הסיב a נקבל מספר ערכים (n ערכים) של β שיקיימו את המשוואה (שים לב ש- β מופיעה בכל אחד מהביטויים של p ו- q והיא הנעלם היחיד במשוואה). מאחר ובכל ערך של m תהיה למעשה פונקציה מסדר שונה (פונקציות בסל הן בעלות מספר סדרים) עם ערכים שונים עבור משתנה הפונקציה (pa ו- qa), הרי שעבור כל ערך של m יתקבלו n ערכים שונים של β , כך שלמעשה אוסף הפתרונות של המשוואה שלעיל מסומן לפי β_{mn} . אוסף הפתרונות הללו הוא מקדמי ההתפשטות השונים שיש לאופנים (כל אופן הוא בעל מקדם התפשטות שונה). באופן עקרוני מסמנים כל אחד מהאופנים של הסיב (כלומר כל אחד מהפתרונות של משוואת הגלים עבור הסיב) באותיות EH_{mn} או HE_{mn} בהתאם למי מהרכיבים בכיוון z של הפתרונות הוא דומיננטי.

אפשר להראות שתחת התנאים שהפרש מקדמי השבירה בין הליבה למעטה קטן מאוד (דהיינו $\Delta \ll 1$) הערכים של השדה (הן המגנטי והן החשמלי) בכיוון z קטנים למדי ביחס לערכים בכיוון הרדיאלי או הזוויתי. תחת תנאים אלה האופנים בסיב למעשה מקוטבים באופן ליניארי (מאחר ואין רכיב שדה בכיוון z והשדה מתפשט בכיוון z). מאחר שהתווך (הסיב) באופן אידיאלי איננו מכיל שבירה כפולה, לא משתנה הקיטוב של האור בסיב. לכן, האור ששודר לסיב כשהוא מקוטב ליניארי שומר על צורה זו במהלך ההתפשטות (זה כמובן רק באופן אידיאלי, באופן מעשי ישנה שבירה כפולה הנובעת ממאמצים שונים לאורך הסיב וכיפופים היוצרים אזורי לחץ המשנים את האיזוטרופיות של מקדם השבירה, דהיינו שבירה כפולה. כמובן שבאופן מעשי קיים רכיב שדה בכיוון z ולכן האופנים אינם מסוג TEM). אופנים אלה נקראים *weakly guided modes* ומסומנים LP_{mn} (לציון Linear Polarization).

כל אופן בסיב נקבע באופן מידי ע"י פתרון המשוואה שלעיל עבור מקדם ההתפשטות. מקובל לנרמל את β בעזרת וקטור הגל k_0 לפי $\bar{n} = \beta/k_0$. הפרמטר החדש $\bar{n}$ מכונה מקדם השבירה האופני והוא מתאר באופן אינטואיטיבי את מקדם השבירה שמרגיש האופן. הערכים של $\bar{n}$ נעים בין מקדם השבירה בליבה לבין מקדם השבירה במעטה לפי $n_2 \leq \bar{n} \leq n_1$. אופן איננו יכול להתקיים אם מקדם השבירה האופני שלו קטן מ- n_2 . כדי להבין מדוע נתבונן בביטוי עבור q :

$$q^2 = \beta^2 - n_2^2(\omega)k_0^2$$

$$\text{if } \bar{n} < n_2$$

then,

$$q^2 < 0$$

and hence,

$$q \in \text{Im}$$

אם q מדומה אז המשמעות של כך היא שמחוץ לסיב במרחק אינסופי ישנו שדה אופטי משמעותי (כלומר השדה לא מתאפס באינסוף), ניתן לראות זאת ע"י התבוננות בפונקציה בסל מסוג K :

$$K_m(q\rho) = (\pi/2q\rho)^{1/2} \exp(-q\rho)$$

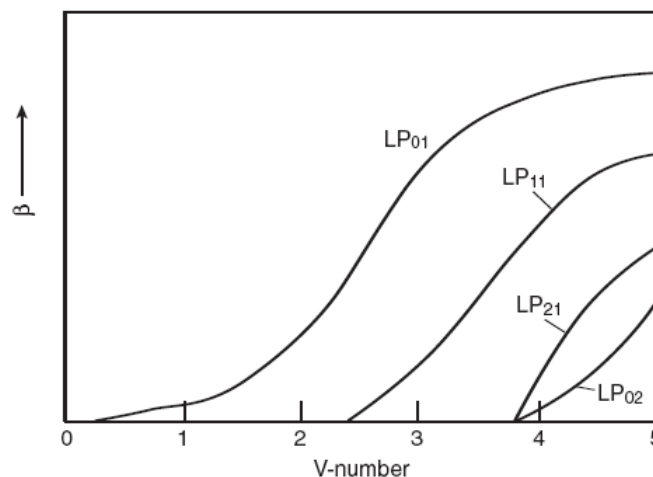
ניתן לראות שהאופן לא יפסיק להתקיים (כי אין דעיכה אקספוננציאלית מחוץ לסיב), גם במרחק אינסופי של ρ יהיה שדה (אם כי קטן). אם השדה קיים באינסוף הרבה מהאנרגיה שמשודרת לסיב תתפשט מחוץ לסיב ולאחר מרחק קצר מאוד ממרכז הסיב לא יותר שדה אופטי משמעותי בסיב – כלומר האופן לא ייתמך בסיב! אומרים שבמצב הגבולי, כאשר $\bar{n} = n_2$ מפסיק האופן להתקיים, במקרה כזה נוכל לרשום:

$$\beta^2 = n_2^2(\omega)k_0^2$$

$$p^2 = n_1^2(\omega)k_0^2 - \beta^2 = n_1^2(\omega)k_0^2 - n_2^2(\omega)k_0^2$$

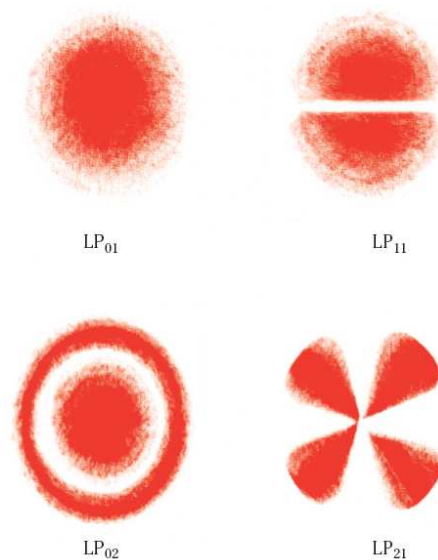
$$p = k_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

מגדירים פרמטר המכונה תדר מנורמל לפי $V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx ak_0NA$, כאשר כפי שניתן לראות הפרמטר מקבע את הקשר בין ארבעת הגורמים שקובעים את ערכה של β . אפשר לתאר בגרף את הפתרונות של β עבור כל V כאשר כל עקומה בגרף מתארת למעשה את הערכים השונים של β באותו אופן תחת תנאים שונים. במקרה של weakly guided fibers מסמנים את האופנים הללו בצמד האותיות LP :



איור 5.4 – מקדם ההתפשטות בסיב בתלות בתדר המנורמל עבור מספר אופנים נמוכים

כידוע, ע"י הנורמה של השדה בכל נקודה ניתן לקבל את עצמת הקרינה בכל נקודה. מאחר וקיבלנו ביטויים לכל רכיבי השדה בכל נקודה במרחב, נוכל לקבל את השקול הווקטורי שלהם בכל נקודה במרחב וממנו לקבל את עצמת הקרינה בכל נקודה. להלן פילוג העצמה המרחבי של מספר אופנים ראשונים בסיב בעל פרמטר V מעט גדול יותר מ 3.85 (כפי שניתן לראות באיור 5.4 רק ארבע אופנים מתקיימים במקרה זה). (ראה איור 5.5). שים לב שהאופן LP₀₁ הוא למעשה האופן HE₁₁ שהוא האופן היסודי בסיב (SMF), האינדקסים במקרה של LP מהווים את הצמתים בפילוג העצמה, כך שהאינדקס n מתאר את מספר הצמתים בקואורדינטה הרדיאלית והאינדקס m מתאר את מספר הצמתים בקואורדינטה הזוויתית.



איור 5.5 – פילוג העצמה של מספר אופנים נמוכים

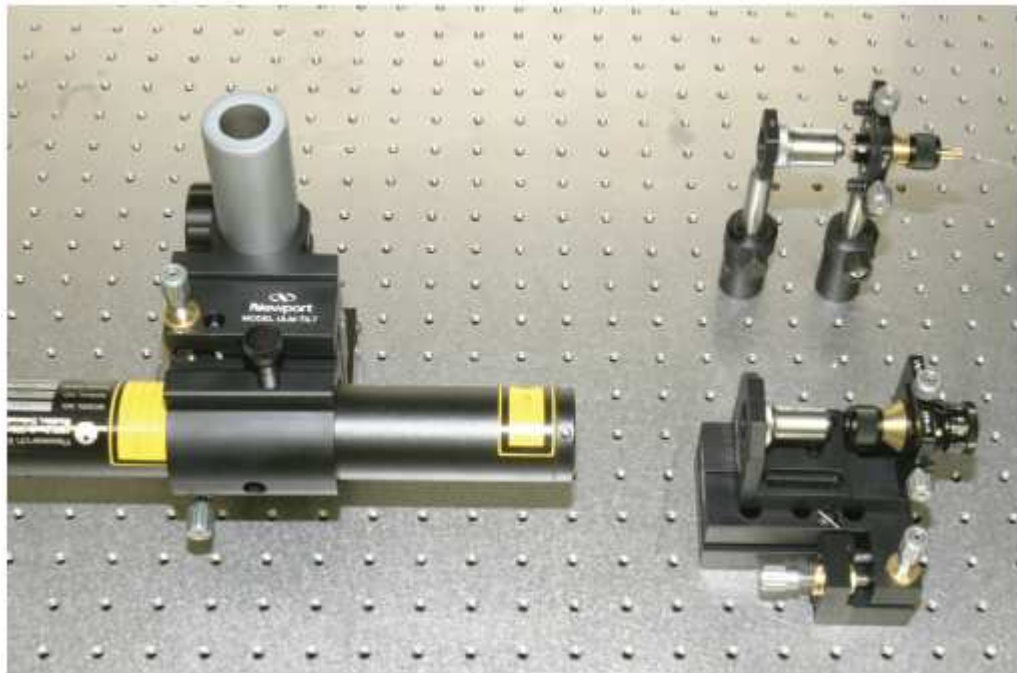
5.3 – מהלך הניסוי

הוצא את הרכיבים הבאים מערכת הניסויים:

Cat#	Description	Qty.
F-SS	4/125 SM at 1550 nm Fiber, 20 meters	1
F-SPV	PM Fiber, 10 meters	1
R-30025	1.5 mW HeNe Laser	1
ULM-TILT	Laser Mount	1
340-RC	Clamp	1
41	Short Rod	1
F-916	Fiber Coupler (without lens)	1
FPH-S	Fiber Chuck	2
M-20X	20X Objective Lens	1
F-CLI	Fiber Cleaver	1
FK-BLX	Allen Wrench Set	1
SK-25A	Screw Kit, ¼-20	1
VPH-2	Post Holder, 2"	2
SPV-2	Post, 2"	2
FP-1A	Fiber Positioner	1
M-40X	40X Objective Lens	1
FK-POL	Polarizer Sheet	1
F-STR-175	Fiber Stripper	1
MH-2PM	Microscope Objective Mount	1
IMIC-1	Fiber Inspection Microscope	1

Additional equipment needed: Millimeter scale, magnifying glass.

1. חתוך כ-2 מטר סיב F-SS ואכן את שני הקצוות שלו, כפי שעשית בניסויים קודמים (במידה ולא קיים הסיב הנ"ל, השתמש בסיב F-SMF-28).
2. התקן את מערכת הלייזר ומקם את הסיב בתוך הרכיב F-916, כפי שעשית בניסויים קודמים.
3. התקן גם את העדשה M-20X על הרכיב F-916 ובעזרת הגלאי שפר את יעילות הצימוד (אתה צריך להגיע בערך ל-1 מיליוואט הקריאה של הגלאי).
4. הרכב את הקצה הרחוק של הסיב בתוך FP-1A והעמד את עדשת המיקרוסקופ M-40X ממולו. (ראה איור של המערכת).



איור 5.6 – תיאור למערכת הניסוי

5. העמד נייר A4 מקופל ממול עדשת המיקרוסקופ M-40X וצפה בכתם האור שנוצר.
6. אתה מתבונן בשדה הרחוק של הסיב. בסיב Step Index השדה הרחוק זהה לשדה הקרוב (כלומר לפילוג השדה בתוך הסיב). בחן את כתם האור שוב.
7. שחק עם שולחן ה-xy (למעשה עם הברגים שעל הרכיב FP-1A) שנמצא על הרכיב F-916 ובחן את כתם האור. צפה באופנים הנוצרים והנעלמים וצייר אותם, ציין אלה אופנים הצלחת לראות ואז איזה קומבינציות של אופנים התגלו לך.
8. בדו"ח, בחלק הדן בתוצאות עליך לתאר את האופנים שקיבלת. נסה להסביר מדוע לדעתך שינוי המיקום של הקצה הקרוב של הסיב גורם לשינוי האופנים הנתמכים בסיב?

5.4 – שאלות הכנה

1. מדוע m חייב להיות מספר שלם בפתרון המודל האופנים שבסיב?
2. מה מציין האינדקס n במודל האופנים בסיב האופטי (עבור הרישום EH_{mn} או HE_{mn})?
3. מה משמעותו של m ברישום LP_{mn} ? ושל n ?
4. בפיתוח מודל האופנים בסיב אופטי מתקבלות ארבע משוואות עם ארבע נעלמים A, B, C ו- D . מהו התנאי ההכרחי על מטריצת המקדמים של ארבעת המשוואות?
5. הגדר את β .
6. עבור איזה ערכים של β אומרים שאופן מסוים מפסיק להתקיים? בטא תשובתך באמצעות אורך הגל של האור ומקדם השבירה של הסיב. מדוע נכונה קביעה זו?
7. מה מציינת כל עקומה בגרף של β vs. V ?
8. כמה אופנים נתמכים בסיב בעל קוטר ליבה של 4 מיקרומטר ו- NA של 0.11 כאשר אורך הגל של האור הוא 633 ננומטר? ועבור 2 מיקרומטר?

ניסוי 6 – אופיין זרם הספק וצימוד משדרי LD ו-LED לסיבים אופטיים

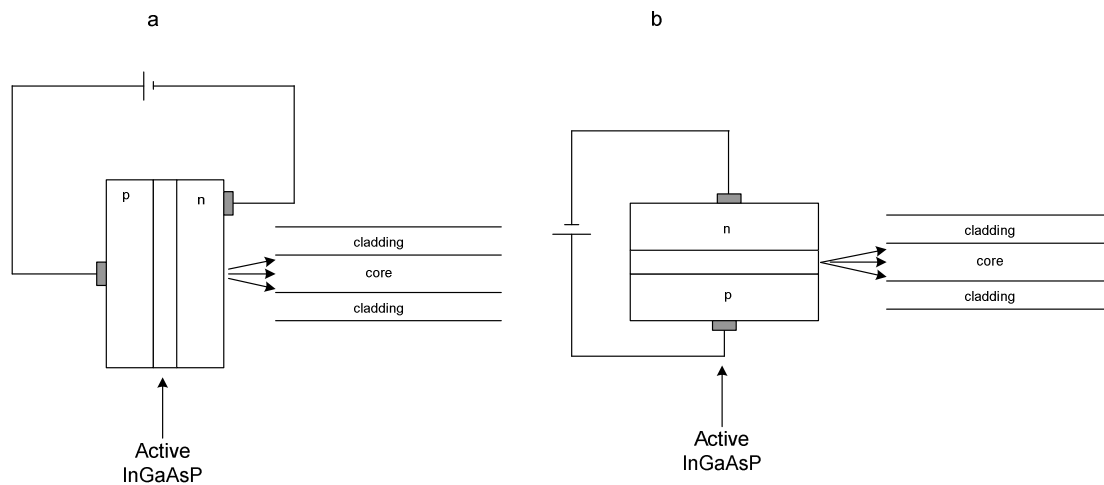
6.1 – הקדמה

בניסוי זה נלמד על אופיין זרם הספק של משדרים המבוססים על מוליכים למחצה (LD ו-LED), וכן על אופן הצימוד שלהם לסיבים אופטיים. הצימוד של המשדרים לסיבים יעשה באמצעות עדשת GRIN עם 0.29 pitch. עדשות GRIN הן העדשות המשמשות ביותר בתקשורת בסיבים אופטיים בגלל גודלם הקטן, המוקד ומרחק העבודה הנוח שלהם. בניסוי זה המשדרים הם LED באורך גל של 830 ננומטר ו-LD באורך גל של 780 ננומטר. מאחר והמשדרים פולטים קרינה שאיננה נראית לעין יש להיזהר שלא להביט ישירות לכיוון המשדר!

6.2 – אופיין זרם הספק של משדרים מבוססי מוליכים למחצה (LD ו-LED)

LED - 6.2.1

צומת p-n בממתח קדמי מהווה דיודת פליטת אור בצורה הפשוטה ביותר שלה. בהתקן זה הקרינה הנפלטת היא איננה קוהרנטית, יש לה רוחב סרט רחב יחסית 30-60 nm והיא נפלטת בזווית פיזור רחבה יחסית ($\theta_{FWHM} \approx 120^\circ$ עבור דיודה משטחית ועבור דיודת שפה $\theta_{FWHM} \approx 30^\circ$). (ראה איור 6.1) ובהספק של מספר מיליוואט בודדים.



איור 6.1 – דיודת פליטת אור משטחית a ודיודת פליטת אור שפה b

ההספק שניפלט בצומת (כלומר ההספק הפנימי) במצב עמיד תלוי בזרם בצומת וביעילות השחבור של האלקטרונים עם החורים (יעילות קוונטית פנימית) בצומת. מכיוון שכמות השחבורים בצומת הינה I/q נרשום:

$$P_{\text{int}} = \eta_{\text{int}} \frac{I}{q} \hbar \omega$$

כאשר η_{int} היא יעילות השחבור (כזכור, לא כל שחבור גורם לפליטת פוטון) ו- $\hbar \omega$ היא כמות האנרגיה שנושא כל פוטון שנפלט (קוונט של אנרגיה). לא כל הפוטונים המתקבלים בתהליך מצליחים לצאת מההתקן

(חלקם נבלעים בחומר וחלקם משתקפים בחפיפה שבין האוויר לדיודה). לכן, אם יעילות היציאה של הפוטונים נלקחת בחשבון ניתן לרשום:

$$P_{ext} = \eta_{ext} P_{int} = \eta_{ext} \eta_{int} \frac{I}{q} \hbar \omega$$

כאשר η_{ext} היא יעילות היציאה של הפוטונים מהדיודה ו- q הוא מטען האלקטרון. מעל הזווית הקריטית $\theta_c = \sin^{-1}(1/n)$ לא תתאפשר העברה (שכן כל הפוטונים יוחזרו בהחזרה מלאה, ראה איור 6.2) ולכן היעילות הקוונטית החיצונית תתקבל ע"י סה"כ הפוטונים שכיוונם קטן מהזווית הקריטית ופונקצית המעבר שלהם היא T_f לפי:

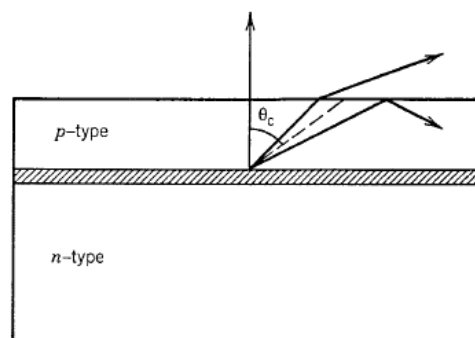


Figure 3.6: Total internal reflection at the output facet of an LED. Only light emitted within a cone of angle θ_c is transmitted, where θ_c is the critical angle for the semiconductor-air interface.

איור 6.2 – זווית קריטית כגורם ליעילות יציאת הפוטונים מהדיודה

$$\begin{aligned} \eta_{ext} &= \frac{\int_0^{\theta_c} T_f(\theta) 2\pi (R \sin \theta) \cdot (R d\theta)}{4\pi R^2} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\theta_c} T_f(\theta) (2\pi \sin \theta) d\theta \approx T_f(0) \frac{1}{4\pi} \int_0^{\theta_c} (2\pi \sin \theta) d\theta \\ &= 4n/(1+n)^2 \frac{1}{4\pi} \int_0^{\theta_c} (2\pi \sin \theta) d\theta = 2n/(1+n)^2 (-\cos \theta) \Big|_0^{\theta_c} = 2n/(1+n)^2 2 \sin^2(\theta_c/2) \\ \sin(\theta_c) &= \frac{1}{n} \rightarrow \sin^2(\theta_c) = \frac{1}{n^2} \ll 1 \rightarrow \sin^2(\theta_c) \approx \theta_c^2 \approx \frac{1}{n^2} \rightarrow \sin^2(\theta_c/2) \approx (\theta_c/2)^2 = \frac{1}{(2n)^2} \\ \eta_{ext} &\approx 2n/(1+n)^2 2 \cdot \frac{1}{(2n)^2} = n^{-1}(1+n)^{-2} \end{aligned}$$

למעשה זהו הקונוס של הקרניים שיוצאות מההתקן כאשר פונקצית העבירות שלהם ניתנת ע"י פרנל (Fresnel). אם מקרבים את פונקצית העבירות לעבירות בפגיעה נורמאלית (כלומר ב-0 מעלות לאנך) הרי ש- $T_f(0) = 4n/(1+n)^2$ (מתוך משוואות פרנל) ולכן נקבל שהיעילות הקוונטית החיצונית המירבית היא מהצורה (זהו ביטוי מקורב לא מדויק, כדי לקבל סדר גודל):

$$\eta_{ext} \approx n^{-1}(1+n)^{-2}$$

את הקרינה הנפלטת אל מחוץ להתקן מזינים לתוך סיב אופטי כך שיעילות הצימוד התיאורטית של הדיודה ניתנת לפי:

$$\eta_c \propto (NA)^2$$

כאשר מתייחסים לדיודה בלבד, ניתן לרשום את היעילות הכללית של ההתקן ע"י היחס בין ההספק החשמלי הניתן להתקן וההספק האופטי שמתקבל בתמורה, כאשר הספק החשמלי ניתן ע"י IV_0 (זרם ישר):

$$\eta_{total} = P_e / P_{electrical} = \left(\eta_{ext} \eta_{int} \frac{I}{q} \hbar \omega \right) / IV_0 = \eta_{ext} \eta_{int} \frac{\hbar \omega}{qV_0} \approx \eta_{ext} \eta_{int}$$

$$\eta_{total} = P_e / P_{electrical} \approx \eta_{ext} \eta_{int}$$

אם מתייחסים גם ליעילות הצימוד של הסיב הנדון, הרי שנצילות הכללית תהא מהצורה:

$$\eta'_{total} = P_{e,Fiber} / P_{electrical} \approx \eta_{ext} \eta_{int} \eta_c$$

לעיתים מגדירים גודל חשוב נוסף המתאר את הקשר בין ההספק האופטי המתקבל מההתקן לעצמת הזרם שמוזרק להתקן, גודל זה מכונה Responsivity:

$$R_{LED} = P_e / I = \eta_{ext} \eta_{int} \frac{\hbar \omega}{q}$$

היחס הזה נשאר ליניארי עד שהזרם גדל לערך של בערך 80 מילי אמפר (בדיודות מסוימות אפילו עד 150 מילי אמפר), שכן כאשר עצמת הזרם גדולה מספיק ההתקן מתחמם והיעילות הקוונטית הפנימית משתנה (יותר שחבורים אינם הופכים לפוטונים) ביחד עם שינוי ביעילות החיצונית התלויה במקדם השבירה שתלוי גם הוא בטמפרטורה.

באופן מעשי אנחנו מודדים את ההספק שמצומד לסיב ע"י גלאי שנמצא בקצה הרחוק של הסיב. מאחר והסיב קצר מעט מההספק מונחת, אבל חלק משמעותי ממנו מונחת בגלל יעילות הצימוד לגלאי, לכן ניתן לרשום באופן עקרוני עבור הניסוי:

$$P_{Detector} / I = P_{e,Fiber} / I \cdot \eta_{c,detector} = \eta_{ext} \eta_{int} \eta_{c,Fiber} \eta_{c,detector} \frac{\hbar \omega}{q} = const$$

אם מניחים שיעילות הצימוד של הסיב לגלאי זהה ליעילות הצימוד של הדידה לגלאי (ללא סיב) ניתן ע"י שתי מדידות עוקבות (פעם אחת למדוד את הספק הדיודה ישירות לגלאי, ממש ממפתח הדיודה ופעם אחת למדוד את ההספק ביציאה מהקצה הרחוק של הסיב המצומד לה) לקבל את יעילות הצימוד הכללית של הסיב לדיודה.

LD – 6.2.2

ללייזרים מוליכים למחצה יש יתרונות רבים על פני LED, הם בעלי עצמה רבה (100 mW), יעילות זיווג גבוהה מאוד לסיב אופטי (50%), ובנוסף לכך בגלל רוחב הפס הספקטראלי הצר יחסית (1-3 ננומטר) מתקבל קצב העברת מידע גבוהה למדי (קצב אופייני של 10 Gbps) ומתאפשר השימוש בהם ברשתות ארוכות תווק (Long haul). מאחר וזמן השחבור שלהם קטן למדי ניתן לאפנן אותם בצורה ישירה בתדרים גבוהים למדי (25 GHz).

בלייזרים מוליכים למחצה מזהמים בשיעור גבוה את צומת ה-p-n כך שכאשר הזיהום מספיק גבוה מתקבל היפוך אוכלוסין. במצב זה תועדף הפליטה המאולצת על פני הפליטה הספונטנית. פוטונים שנוצרים בשכבה האקטיבית יתרבו ויתקבל תהליך הגבר לאורך השכבה.

ההגבר לבדו איננו מספיק לקבלת לייזר, בנוסף לתהליך ההגברה דרוש מהוד הנוצר באופן טבעי בצומת p-n הטרונגנית ע"י השפות של השכבה האקטיבית והאוויר (ראה איור 6.3). כל שפה היא בעלת החזר מהצורה:

$$R_m = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

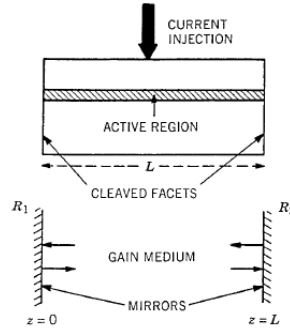


Figure 3.10: Structure of a semiconductor laser and the Fabry-Perot cavity associated with it. The cleaved facets act as partially reflecting mirrors.

איור 6.3 – תאור סכמטי של מהוד הלייזר

מאחר וחלק מהפוטונים שנוצרים במהוד אינם מוחזרים, בתהליך של שיווי משקל לא יתאפשר תהליך של בנית אוכלוסיית הפוטונים במהוד. ואולם, כאשר מגדילים את הזרם יותר שחבורים יתרחשו ואוכלוסיית הפוטונים תגדל מעל לרמת הסף כך שיתאפשר תהליך של הגבר. הזרם בו מתחילה הלזירה מכונה זרם הסף. מאחר ועבור כל אלקטרון נוסף מעל לזרם הסף יתקבל פוטון (ההפסדים כולם כבר נלקחים בחשבון בזרם הסף, אם כי שחבורים לא קרינתיים שטרם נלקחים בחשבון – ראה המשך) ומאחר שזמן החיים של פוטון במהוד הוא τ_p , קצב יצירת הפוטונים בלייזר יינתן לפי:

$$P = \frac{I - I_{th}}{q} \tau_p$$

and,

$$P_{emitted} = \frac{1}{2} \underbrace{\text{two}} \underbrace{\text{facet}} \underbrace{\text{photon}} \underbrace{\text{energy}} \underbrace{\text{time}} \underbrace{\text{to escape}} \hbar \omega v_g \alpha_{mir} P$$

כאשר $P_{emitted}$ זה ההספק הנפלט מהלייזר. באופן פנומנולוגי נכניס את הנצילות הקוונטית להספק הפליטה כדי לתאר את העובדה שחלק מהשחבורים הם אינם קרינתיים ונקבל:

$$P_e = \eta_{int} \frac{1}{2} \hbar \omega v_g \alpha_{mir} P = \eta_{int} \frac{1}{2} \hbar \omega v_g \alpha_{mir} \frac{I - I_{th}}{q} \tau_p = \frac{\hbar \omega}{2q} \overbrace{\frac{\eta_{int} \alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}}}^{\eta_d} (I - I_{th}) = \frac{\hbar \omega}{2q} \eta_d (I - I_{th})$$

$$\alpha_{mir} = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

כאשר η_d מכונה נצילות קוונטית דיפרנציאלית. שים לב שזהו ההספק שנפלט מהלייזר ואין צורך (כפי שעשינו ב-LED) להתייחס להחזרת הפוטונים שכן כבר נלקחת בחשבון בתוך η_d . כזכור α_{int} היא ההפסדים בשכבה האקטיבית של המהוד ו η_{int} מתארת את יעילות השחבור של האלקטרונים והחורים בשכבה האקטיבית. אפשר להגדיר נצילות חיצונית של ההתקן לפי כמות הפוטונים שנפלטים ביחס לכמות האלקטרונים שהוזרקו:

$$P_e = \frac{\hbar\omega}{2q} \eta_d (I - I_{th})$$

$$\eta_{ext} = \frac{2P_e}{I/q} = \eta_d (1 - I_{th}/I)$$

את הנצילות הקוונטית הכללית ניתן לתאר לפי ההספק הכללי שניפלט לעמדת ההספק החשמלי שהוזרק:

$$\eta_{tot} = \frac{2P_e}{IV_0} = \frac{\hbar\omega}{qV_0} \eta_{ext} \approx \frac{E_g}{qV_0} \eta_{ext}$$

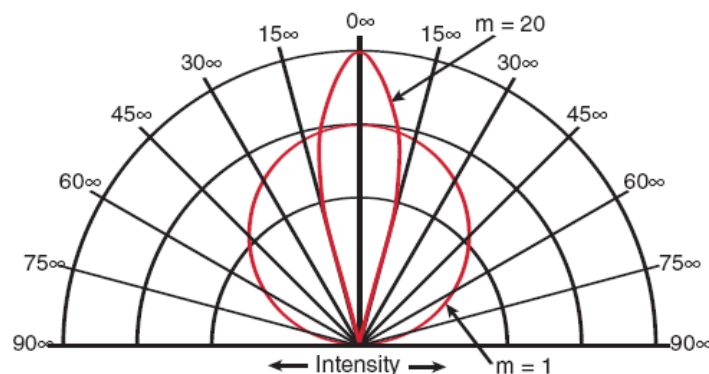
ערכים אופייניים לנצילות הקוונטית הכללית הם 20% - 50% עבור GaAs ו-InGaAsP, בהתאמה. בנוסף לכך יש צורך לקחת את יעילות הזיווג של הלייזר לסיב η_c שהיא בדרך כלל 80% ויותר עבור רב הלייזרים. בניסוי שלנו אנו מודדים את ההספק פעמיים, פעם אחת ישירות לגלאי ופעם שנייה דרך הקצה הרחוק של הסיב אליו אנו מצמידים את ה-LD. באופן הזה נוכל לקבל את יעילות הצימוד שעשינו. בנוסף לכך אנו מקבלים אופיין זרם הספק וע"י אקסטרפולציה להספק אפס נוכל למצוא את זרם הסף של הלייזר.

6.3 – פרופיל הקרינה של LD ו-LED

מבין אוסף הפרמטרים שמבדילים מקורות אור, ניתן לאפיין מקור אור ע"פ הפילוג המרחבי של הקרינה שלו (כלומר פרופיל ההספק במרחב). מקורות בד"כ מחולקים לשני סוגים עקרים בהתאם לפיזור הקרינה שלהם. שני הסוגים הם מקורות למברטים (Lambertian) ומקורות מכוונים (collimated). מקור שפולט קרינה בזוויות קטנות מסביב לאנך למשטח הפליטה מכונה מקור בעל אלומה מכוונת (collimated beam). האלומה של הלייזר HeNe היא דוגמה לאלומה כזו. באופן עקרוני הפיזור הזוויתי של הקרניים היוצאות ממקור יכול להיות מתואר ע"י המשוואה:

$$B(\theta) = B_0 \cdot (\cos \theta)^m, \quad \theta < \theta_{max}$$

כאשר θ_{max} היא הזווית הגדולה ביותר שנפלט בה אור והיא נקבעת בהתאם לסוג המשדר (המקור). כאשר המקור הוא LD $m=20$ וכאשר המקור הוא HeNe $m \gg 20$ (very collimated beam), לעמדת זאת כאשר המקור הוא LED m קטן יחסית, $m=1$. איור 6.4 מתאר פרופיל קרינה אופייני של LD ו-LED בקואורדינטות פולריות.



איור 6.4- פרופיל הקרינה האופייני של LD ו-LED

באופן תיאורטי ניתן להראות שיעילות הצימוד של מקור אור בעל m מסוים לסיב אופטי הינו מהצורה:

$$P_{Fiber} / P_{Transmitter} = 0.5(m+1)[\alpha / (\alpha + 2)]NA^2$$

Where,

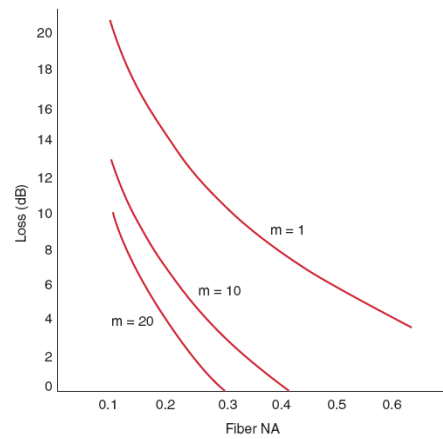
step index fiber : $\alpha = \infty$

GRIN fiber : $\alpha = 2$

את הפסדי הצימוד ניתן לתאר ביחידות של dB כך ש-

$$Loss = -10 \log_{10}(P_{Fiber} / P_{Transmitter})$$

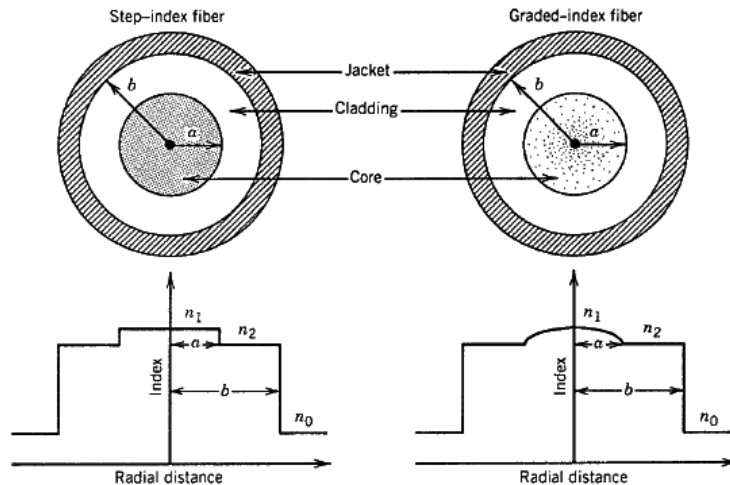
איור 6.5 מתאר מספר סוגי מקורות והפסדי הצימוד שלהם לסיבים עם NA שונים.



איור 6.5 – הפסדי צימוד לסיב אופטי של מספר משדרים שונים

6.4 – עדשות GRIN וצימוד משדרים באמצעותן

הניסוי שלפנינו עושה שימוש בעדשות GRIN כדי לשפר את יעילות הצימוד של המקור לסיב. רב ההתקנים האופטיים שמצומדים לסיבים בתקשורת נעזרים בעדשות GRIN בגלל איכות הצימוד הגבוהה שלהם. עדשות GRIN הן למעשה קטע קטן מסיב GRIN. סיבי GRIN הינם בעלי פרופיל מקדם שבירה המשתנה באופן פרבולי לרוחב חתך הסיב (ראה איור 6.6).



איור 6.6 – תאור סכמטי של סיב אופטי מסוג GRIN (ימין) ו-Step Index Fiber (שמאל)

פרופיל מקדם השבירה של סיבים אלה ניתן באופן מתמטי לתיאור לפי המשוואה הבאה:

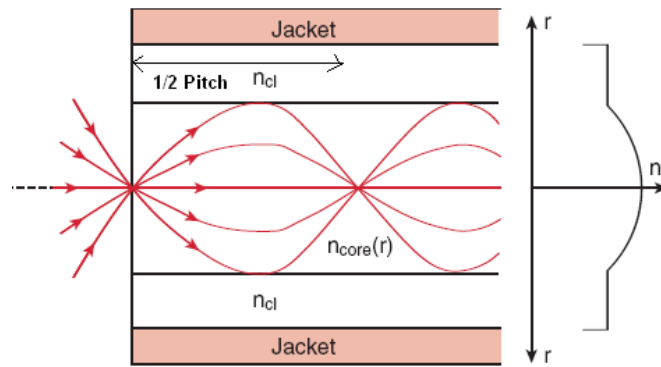
$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - \Delta (r/a)^\alpha], & r < a \\ n_1 (1 - \Delta) = n_2, & r \geq a \end{cases}$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$$GRIN \rightarrow \alpha = 2$$

$$Step\ Index \rightarrow \alpha = \infty$$

עבור $\alpha=2$ פרופיל מקדם השבירה הוא פרבולי ו- a הוא רדיוס ליבת הסיב. מאחר ומקדם השבירה משתנה בהדרגה לרוחבו של הסיב, הפרש הזמנים שבין מסלולים אופטיים שונים בסיב הופך קטן ביותר. באופן עקרוני, בקרוב הפראקסיאלי, הפרש הזמנים הוא אפס עבור פרופיל פרבולי (ראה איור 6.7). באופן מעשי כן קיים הפרש זמנים שניתן להבינו על בסיס פתרון מדויק למודל האופנים לסיב GRIN.



איור 6.7 – קרניים בסיב GRIN בעלות מסלולים שונים אבל זמן מעוף זהה

המסלול האופטי של הקרניים בתוך סיב אופטי מסוג זה מתקבל ישירות מתוך משוואת הקרן עבור קואורדינטות גליליות (בקרב הפראקסיאלי – כלומר בקרב של זוויות קטנות ביחס לציר האופטי). משוואת הקרן בקואורדינטות גליליות היא:

$$\frac{\partial^2 r}{\partial z^2} = \frac{1}{n_1} \frac{\partial n}{\partial r}$$

כאשר,

$$r_0 = r(z=0)$$

and

$$r'_0 = \left. \frac{dr}{dz} \right|_{z=0} \approx \theta$$

$$n = \begin{cases} n_1 [1 - \Delta (r/a)^2], & r < a \\ n_1 (1 - \Delta) = n_2, & r \geq a \end{cases}$$

ניתן להראות שתחת התנאים הללו הפתרון למשוואת הקרן, כלומר מסלול הפוטונים, יהא מהצורה:

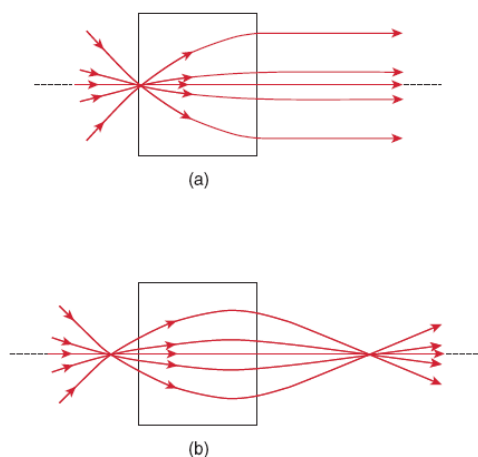
$$r(z) = r_0 \cos(pz) + (r'_0 / p) \sin(pz)$$

where,

$$p = (2\Delta / a^2)^{1/2}$$

לכן המסלול האופטי של הפוטונים הוא סינוסואידאלי באיור לעיל.

תופעה מעניינת למדי בסיבי GRIN היא שניתן להשתמש בהם לצורך מיקוד אור. הדרך לעשות זאת היא ע"י שימוש במקטע קצר מתוך הסיב GRIN. קיימים שני סוגי עדשות GRIN, 0.29 pitch ו-0.25 pitch. (ראה איור 6.7). עדשת 0.25 pitch מתוארת באיור 6.8 a והיא משמשת למיקוד אור לתוך סיב או לשידור אור מנקודה בצורה מקבילית (collimated beam). לעיתים לא מעוניינים באלומה מקבילית, למשל כאשר מעוניינים למקד את האור היוצא מהמשדר על פניו של סיב אופטי או מיקוד אלומה מסיב על פניו של גלאי אופטי, מקרים אלה משתמשים בעדשה שחתוכה מעט ארוך יותר (0.29 pitch), ראה איור 6.8 b.



איור 6.8 – עדשות GRIN . (a) 0.25 pitch GRIN ו- (b) 0.29 pitch GRIN

6.5 – מהלך הניסוי

הוצא את הרכיבים הבאים מערכת הניסויים:

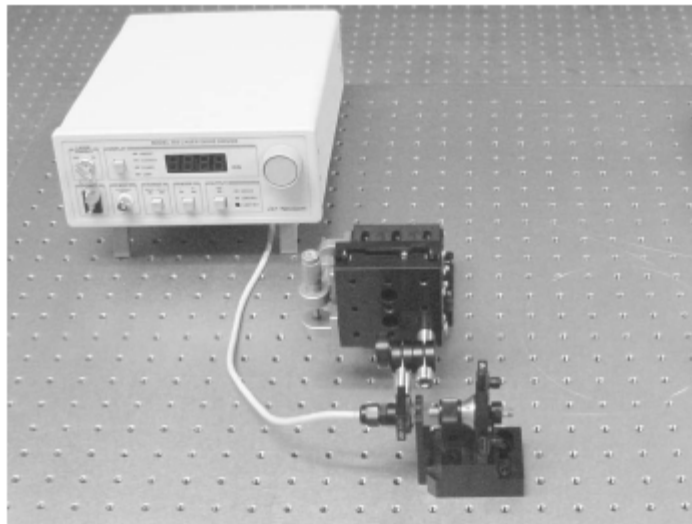
Cat#	Description	Qty.
F-MLD	100/140 MM Fiber, 50 meters	1
F-CL1	Fiber Cleaver	1
1918-C	Power Meter	1
918D-SL-OD3	Low Power Detector, Silicon	1
FK-BLX	Allen Wrench Set	1
SK-25A	Screw Kit, ¼-20	1
423	Translation Stage	3
SM-13	Micrometer, 13 mm	3
360-90	Angle Bracket	1
B-1A	Base	1
VPH-2	Post Holder, 2"	2
SPV-2	Post, 2"	3
F-925	GRIN-Rod Lens Fiber Coupler	1
FK-18281-30B	Laser Diode	1
FL-ILD	Laser Diode Assembly	1
FK-LED	Light-Emitting Diode Assembly	1
505B	Laser Diode/LED Driver	1
LGI830-6	0.29-p GRIN Lens (without filter)	1
FK-POL	Polarizer Sheet	1
F-IRC1	IR Phosphor Card	1
CA-2	Universal Clamp	1
F-STR-175	Fiber Coating Stripper	1
FK-STRAP	Grounding Wrist Strap	1
IMIC-1	Fiber Inspection Microscope	1
FPH-S	Fiber Holder	1
818-FA2	Fiber Optic Adapter	1
FP3-FH1	Bare Fiber Holder	1

Optional Equipment: Newport G3919 Laser Goggles

הערה:

מכיוון שהמשדרים שאנו עובדים איתם בניסוי זה אינם בעלי קרינה שנראית לעין יש לנהוג במשנה זהירות בשימוש בהם. לעולם אל תשאיר את המשדר עובד שלא לצורך, לעולם אל תתבונן אל מפתח המשדר. ה-LD שברשותך רגיש במיוחד לחשמל סטטי, לבש את חגורת הארקה בכל זמן שאתה עובד עם המשדר! המכשירים שאתה עובד איתם בניסוי זה יקרים למדי, אין להפעיל אותם ללא השגחת המדריך.

1. הרכב שולחן xyz בעזרת שלוש הרכיבים 423 ובשימוש ברכיב 90-360, התייעץ עם המדריך אם אינך יודע כיצד.
2. חבר את הדרייבר של המשדר 505B לחשמל ולבש את חגורת הארקה FK-STRAP. חבר את חגורת הארקה בפנל האחורי של הדרייבר.
3. הברג את הרכיב FL-ILD על הרכיב "SPV-2", התקן את הרכיב "VPH-2" על שולחן ה-xyz שבנית והצב את ה-SPV-2 ביחד עם המשדר בתוכו. התבונן באיור של המערכת:



איור 6.9 – תיאור למערכת הניסוי

4. הוצא את ה-LD מהאריזה והתקן בתוך הרכיב FL-ILD. שים לב שאינך פוגע בשלושת הפינים של ה-LD בעת ההתקנה, נהג במשנה זהירות!
5. בדוק שהדרייבר של ה-LD (הרכיב 505B) כבוי. וודא שוב! בדוק שהינך לובש את חגורת הארקה ושהיא מחוברת היטב בפנל האחורי של הדרייבר. חבר את כבל ה-LD לדרייבר (שקע 15 פינים בפנל האחורי של הדרייבר).
6. חבר את הגלאי 918D-SL-OD3 למודד העצמה 918-C והצב את הגלאי ממול לראש המשדר, צמוד ככל האפשר. הפעל את הדרייבר של ה-LD והעלה בזהירות את עצמת הזרם. התבונן בשינוי ההספק האופטי בעת שינוי עצמת הזרם. שים לב, דיודת הלייזר שברשותך בעלת זרם סף נומינאלי של 30 mA וזרם עבודה אופטימאלי של 60 mA (ההספק האופטי הנפלט בזרם אופטימאלי הינו 20 mW). על תעבור את הזרם האופטימאלי ביותר מ-10%, אחרת אתה עלול להרוס את ה-LD.

7. רשום את ההספק המתקבל עבור הזרם האופטימאלי.
8. הפחת את עצמת הזרם לאפס. רשום את ההספק האופטי עבור זרם ה-LD, מדוד את ההספק בקפיצות של 2mA. בצע רשום מדויק, בדו"ח יהיה עליך לתת את אופיין ההספק כנגד זרם ולמצוא את זרם הסף. למעשה, הניסוי שבצעת הוא אחד הדרכים למצוא את זרם הסף באופן ניסיוני לפני שה-LD יוצאת מרצפת הייצור.
9. השתמש בנייר ה-IR כדי לראות את אלומת הלייזר. הנח את נייר IR Phosphor card במקום נוח ממול למשדר. העזר בסרגל קטן ומדוד את המרחק מהנייר למפתח הלייזר, כמו כן מדוד את מימדי כתם האור שמופיע על הנייר. בצע רשום של הדברים. בדו"ח יהיה עליך לנקוב בערכים אלה ולחשב את זוויות הפיזור (beam divergence) של האלומה (אפשר להתייחס לכתם האור כאילו היה כתם מלבני ואז לחשב את זווית הפתיחה של האלומה ביחס לכל אחת מצלעות המלבן).
10. בחן את קיטוב האור היוצא מהלייזר. השתמש במקטב FK-POL וקבע באמצעותו את כיוון הקיטוב של הלייזר, דווח למדריך על ממצאך.
11. הצב את הרכיב F-925 במקום נוח ממול ללייזר. (ראה את האזור של המערכת).
12. הוצא את עדשת ה-0.29 pitch GRIN מהאריזה ובוהירות רבה התקן אותה בתוך ה-V groove שנמצא ברכיב F-925 כך שכ-1 מ"מ ממנה יוצא החוצה מהחריץ אל כיוון המשדר, חזק את הבורג וקבע את העדשה - התייעץ במדריך!
13. חתוך כ-2 מ' מהסיב F-MLD ואכן את שני הקצוות שלו, כפי שעשית בניסויים קודמים.
14. התקן קצה אחד בתוך הרכיב FPH-S והשחל לתוך ה-FP-1A שנמצא על הרכיב F-925. מקם את קצה הסיב כ-2 מ"מ מקצה העדשה.
15. התקן את הקצה הרחוק של הסיב בתוך הרכיב FP3-FH1, הברג את הרכיב 818-FA2 לגלאי וצמד את הקצה הרחוק של הסיב לגלאי.
16. שחק עם שולחן ה-xyz של המשדר כך שחלון הלייזר עומד בדיוק מול העדשה ובמרחק קרוב ככל האפשר לעדשה. בחן את ההספק המופיע בגלאי, שפר את הצימוד ע"י משחק עם מיקום הלייזר בלבד.
17. שחק עם הקצה הקרוב של הסיב במרחב באמצעות שולחן ה-xyz (FP-1A) תוך כדי שאתה צופה בעצמת ההספק המופיעה בגלאי. שפר לערך מרבי את הצימוד. בצע רישום של עצמת הקרינה כאשר הזרם הוא אופטימאלי (60 mA). קבע את יעילות הצימוד (גם ביחידות של dB). דקדק! בדו"ח יהיה עליך להציג את התוצאות. עליך להגיע לתוצאה טובה מ-4dB.
18. כבה את הלייזר. נתק הלייזר ואכסן בצד עד לסוף הניסוי.
19. הוצא את הדיודה מהאריזה (FK-LED) והתקן אותה במקום ה-LD.
20. חבר את הדיודה לדרייבר ועלה את הזרם עד ל-100mA ורשום את עצמת ההספק המתקבלת (הצמד את הגלאי למפתח הדיודה). נהג לפי כללי הזהירות.
21. הורד את עצמת הזרם לאפס. בצע רשום מדויק של הספק המוצא של ה-LED תוך כדי שאתה משנה את עצמת הזרם בקפיצות של 5 mA החל 0 mA ועד 110 mA. בדו"ח יהיה עליך להציג את התוצאות בגרף, הקפד על רישום מדויק.

22. בחן את כתם האור של ה-LED בעזרת כרטיס ה-IR Phosphor card. בצע רישום מדויק כפי שעשית עבור ה-LD. שים לב, בתוך המרכב של ה-LED קיימת עדשה קטנה המרכזת את אלומת ה-LED ולכן לא יתקבל כתם אור בדיוק כמצופה מ-LED, אלומת האור תהיה מעט מקבילית וצרה יחסית. יחד עם זאת, העדשה איננה מתקנת לגמרי את אופי אלומת ה-LED ולכן יתקבלו המאפיינים הכלליים של אלומת ה-LED. ציין בדו"ח את השוני בצורת הכתם לעומת כתם האור של ה-LD.
23. בחן את קיטוב אלומת האור היוצאת מה-LED, ציין בדו"ח האם האלומה מקוטבת.
24. צמד את ה-LED לסיב אופטי F-MLD שהכנת עבור ה-LD. חשב את הפסדי הצימוד בזרם העבודה של ה-LED (100 mA).

6.6 – שאלות הכנה

1. מהו רוחב הפס האופייני של LED? ושל LD?
2. נתונה צומת p/n בעלת מקדם שבירה 3.5, ויעילות קוונטית פנימית 0.2. הצומת מהווה LED הפולטת אור סביב אורך גל של 830 ננומטר. מספקים זרם של 50 mA לדיודה, מהו ההספק שנפלט מהדיודה? מצמידים את הדיודה לסיב מסוג Step Index עם $NA=0.3$, חשב את יעילות הצימוד ביחידות של dB. איך תשתנה תשובתך עם הסיב הוא מסוג GRIN?
3. רשום שלושה יתרונות של LD על פני LED.
4. נתון LD פשוטה בעלת שכבה אקטיבית באורך של 200 מיקרומטר עם מקדם הפסדים של 30 cm^{-1} ומקדם שבירה 3.3. זרם הסף של ה-LD הוא 30 mA ואילו הזרם האופטימאלי הוא 60 mA. ידוע שהנצילות הקוונטית של ה-LD היא 50% ושהיא פולטת אור באורך גל של 780 ננומטר. חשב את ההספק המוצא הצפוי של ה-LD. מהו ההספק הצפוי בכניסה לסיב כאשר הלייזר מצומד לסיב מסוג Step Index (הנח שה-NA של הסיב הוא 0.2)? כיצד תשתנה תשובתך אילו היה מדובר בסיב מסוג GRIN?
5. צייר את פרופיל מקדם השבירה של עדשת GRIN. באיזה עדשה תבחר לעבוד, 0.25 pitch או 0.29 pitch כאשר תצמד סיב אופטי למשדר LED, LD או לגלאי אופטי? הסבר את בחירתך בעזרת שרטוט.
6. כיצד לדעתך יראו המסלולים האופטיים בעדשת GRIN בעלת 0.75 pitch? שרטט.

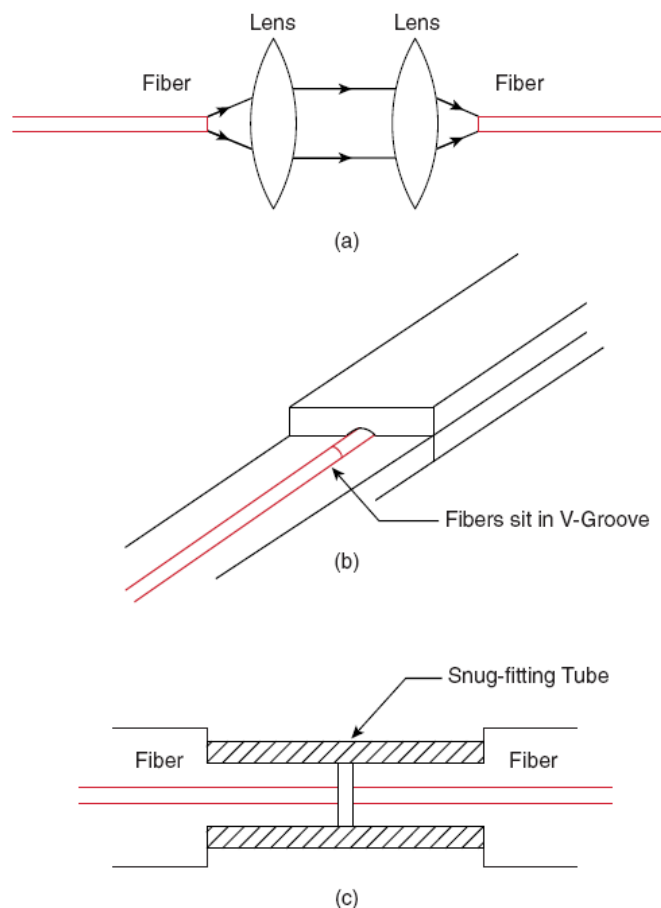
ניסוי 7 - חיבור סיבים אופטיים (Butt coupling, connectors & splices).

7.1 - רקע תיאורטי

בניסויים הקודמים התנסו עם צימוד סיבים למקורות (LED, LD). בניסוי זה נלמד איך מצמידים שני קצוות של שני סיבים. קיים צורך בסיסי בתקשורת לחבר שני סיבים אחד לשני, בניסוי זה נכיר שתי שיטות של חיבור (1) חיבור באמצעות connectors (2) חיבור באמצעות splices. הניסוי מתחיל בהכרת ההפסדים שנגרמים עקב צימוד לקוי בין סיבים.

7.2 - רכיב צימוד בין סיבים

לכל אחד משני הרכיבים (Connectors and Splices) יש את השימושים האופייניים לו. ב- Connectors משתמשים כדי לחבר סיב למערכת המשדר או למערכת המקלט או לכל רכיב אחר במערכות תקשורת אופטית ואילו ה- Splice הוא רכיב שמשמש לחיבור קבוע בין שני קצוות סיבים והוא מופיע בעיקר בתוך ארונות תקשורת.

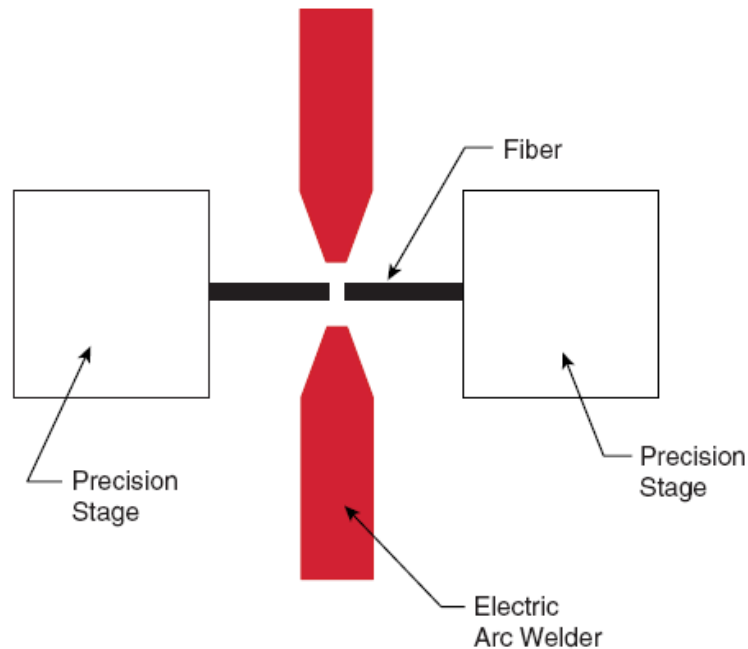


איור 7.1 - מחברים שונים של סיבים אופטיים

כשמשתמשים במחברים אופטיים (Connectors) קיימות מספר שיטות לביצוע הצימוד בין שני הקצוות שדרוש לחבר אותן. באחת מהן משתמשים בשתי עדשות על מנת להדמות את הגרעין של הסיב הראשון לגרעין של הסיב השני (איור 7.1a), בשיטה השנייה, פשוט, מניחים את שני הראשים של הסיבים אחד מול השני,

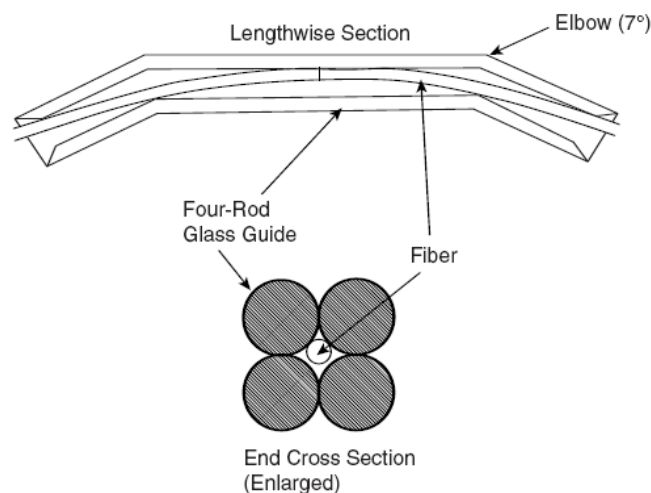
חיבור כזה נקרא Butt Coupling (איור 7.1a&b). כאשר מצמידים שני סיבים ע"י Connector ההפסדים האופייניים לחיבור (MM) הם בסדר גודל של $0.1\text{ dB} - 1.0\text{ dB}$.

חיבור Splices קבועים נעשה בד"כ ע"י מיזוג שני הקצוות באמצעות היתוך תרמי של שני הראשים, לפעמים תוך כדי בקרה אלקטרונית של פעולת היישור (כאשר בעזרת מצלמה ממקמים את שתי הליבות זו מול זו ומתיחים אותם יחד). במקרה כזה ניתן להגיע להפסדים של כ- $0.01\text{ dB} - 0.1\text{ dB}$ (ראה איור 7.2).



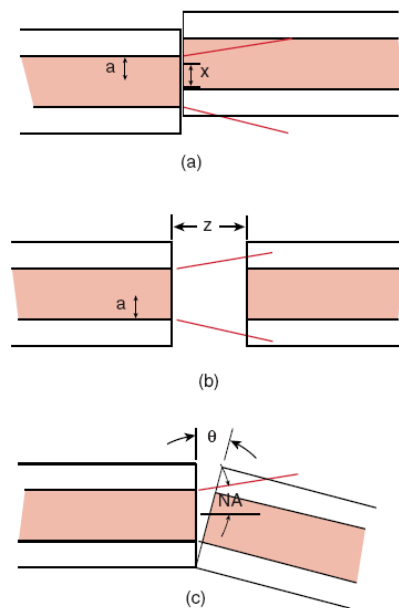
איור 7.2 – חיבור Splice באמצעות היתוך

השיטה השנייה בחיבור splice היא להכניס את שני הראשים לתוך חריץ הבנוי באמצעות ארבע חתיכות של זכוכית, לתאם בין מקדמי השבירה ע"י חומר מתאם שמתווסף בין שני הסיבים, ולקבע את הסיבים ע"י חומר דבק (אפוקסי). מפעיל לא מיומן יכול להגיע להפסדים של כ- $0.1\text{ dB} - 0.3\text{ dB}$ (איור 7.3). השיטה הטובה ביותר לחיבור Splices היא ע"י היתוך, כפי שהזכרנו מקודם יותר.



7.3 - הפסדי יישור בסיבים Alignment Losses

קיימים שלושה מקורות עקרים להפסדים כאשר מחברים שני סיבים באמצעות שני הרכיבים שהזכרנו מקודם (Connectors and Splices). המקור הראשון, הוא הפסדים כתוצאה מאי יישור צדדי (Lateral misalignment), כלומר מהזחה צדדית של ליבה של סיב אחד ביחס לליבה של הסיב שממולו. המקור השני להפסדים הוא הפרדה אורכית בין הסיבים (Longitudinal separation), כלומר מעצם היותו של סיב אחד מרוחק מהסיב שממולו פחות אור מצומד לסיב. המקור השלישי הוא הפסדים כתוצאה מאי יישור זוויתי בין שני הסיבים (Angular misalignment), שלושת המנגנונים ליצירת ההפסדים מתוארים באיור 7.4.



איור 7.4 – מנגנונים שונים הגורמים להפסדים בחיבור Splice

הדרישה בתכנון הרכיבים לחיבור היא למזער ככל הניתן את שלושת ההפסדים הנ"ל. ההפסדים בפעולת החיבור יכולה להיות מאחד מהם או מהצירוף של שניים או שלושה מהם. הגורם הראשון (Lateral misalignment) הוא הגורם הכי משמעותי בגרימת ההפסדים והוא נוצר עקב אי התאמה בין הקטרים של שני הסיבים או פעולת יישור לא תקינה בהנחת שני הסיבים אחד מול השני. הגורם השני (Separation misalignment) נוצר עקב הפרדה פיזית בין שני הקצוות, הגודל של ההפסדים שנגרמים בסוג זה של הפסדים תלויים במפתח הנומרי של הסיבים כי ההרחקה באה לידי ביטוי בהתבדרות האלומה היוצאת מהסיב הראשון כך שחלק ממנה איננו נקלט ע"י הסיב השני. בד"כ בשימוש ב- Connectors מתכננים את החיבור כך שקיים רווח קטן בין שני קצוות הסיבים (כדי לא לגרם נזק לפני הסיב בעת הניתוק והחיבור), ולכן הפסדים אלה בד"כ נמצאים בצורה יסודית בחיבור סיבים. הסוג השלישי של הפסדים הוא פחות משמעותי כי בד"כ הסיבים עשויים בצורה שאיננה רגישה לאי יישור זוויתי (כמובן שעם אי היישור הזוויתי מוגזם ההפסדים יהיו גדולים).

באיורים 7.5, 7.6 ו- 7.7 מתוארים ההפסדים משלושת המנגנונים שהוזכרו עבור סיב מסוג Graded index. עבור סיב מסוג Step index החישוב הוא הרבה יותר פשוט, והוא מתקבל ע"י חישוב איזור החפיפה של האלומה בין שני הסיבים.

ההפסדים מ- separation misalignment מחושבים ע"י חישוב החלק היחסי של שטח הקרן שנלכד ע"י הסיב השני מסה"כ שטח שבוקע מהסיב הראשון. במקרה של הפסדים מ- angular misalignment הם מחושבים באותה שיטה אלא שהפעם במקום $\frac{z}{a}$ משתמשים ב- $\frac{\theta}{NA}$ כ- scaling factor. כדי לקבל תמונה לגבי ההפסדים המותרים בסיבים כתוצאה מחיבור סיב-סיב, ניתן את הערכים האלה: עבור סיב רב-אופני Multimode עם קוטר $50\mu m$, ומפתח נומרי $NA = 0.2$ נקבל הפסדים של 0.1 דיציבלים כאשר ההטייה היא $1\mu m$ ב- Lateral offset, המרחק הוא $4\mu m$ ב- Longitudinal separation ו- 0.5° מעלות עבור Angular misalignment. הבעיה מחמירה יותר עם סיב חד אופן Single mode, אם נקח לדוגמא סיב כזה עם קוטר $4\mu m$ ומפתח נומרי של- $NA = 0.1$ נקבל הפסדים של $0.1db$ כאשר ההטייה היא $0.1\mu m$ ב- Lateral offset, המרחק הוא $0.7\mu m$ ב- L ב- Longitudinal separation, ו- 0.2° מעלות עבור Angular misalignment. אלה היו הפסדים/ערכים אופייניים לשני סוגי הסיבים שמתקבלים כאשר מבצעים חיבור סיב-סיב.

יש לשים לב כי ההפסדים הנ"ל הם רק ההפסדים שמתקבלים מחיבור שני סיבים. יש להוסיף לזה את ההפסדים שמתקבלים מהחזרות פרנל שהם מסדר גודל של עוד $0.2db$ ואת ההפסדים שנגרמים מחיתוך לקוי של קצוות הסיבים.

ההתייחסות עד כה הייתה להפסדים שנגרמים מהצבת שני הסיבים אחד מול השני, מה שנקרא Butt Coupling. כאשר משתמשים במערכת עדשות לצימוד הסיבים, מורידים בצורה ניכרת את התרומה של Lateral offset & Longitudinal offset אבל ההתקן נעשה מאוד רגיש להפסדים מסוג Angular misalignment.

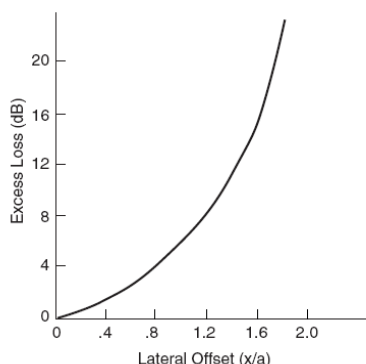


Figure 7.5 Lateral offset loss for graded-index fibers. Note that the offset has been normalized to the fiber core radius.

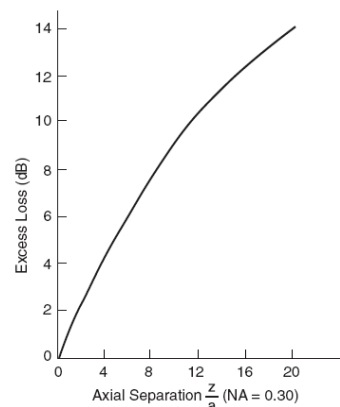


Figure 7.6 Axial separation loss for graded-index fibers. Note that the separation has been normalized to the fiber core radius. NA=0.30 was used in the calculation.

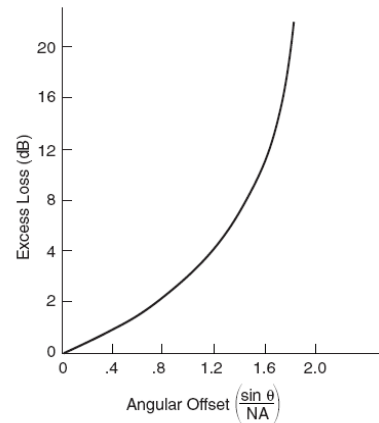


Figure 7.7 Angular misalignment loss for graded-index fibers. Note that the angle has been normalized to the fiber NA.

איורים 7.5-7.7 – אופייני הפסד שונים

בגרפים 7.5, 7.6 ו-7.7 ניתנו חישובים תיאורטיים להפסדים שבאו משולשת הגורמים עליהם דיברנו מקודם, שים לב לנרמול של הצירים לרדיוס הסיב. במקרה של חישוב הפסדים זוויתיים הנרמול נעשה למפתח הנומרי של הסיב כפי שהוזכר מקודם.

7.5 - שאלות הכנה

1. מהם סוגי ההפסדים שנגרמים כתוצאה מחיבור שני סיבים?
2. הנח כי בסיב רב אופני מסוג Step index, ההספק מתפלג בצורה אחידה על הגרעין של הסיב כאשר ההספק שמתפשט במעטה הוא זניח. קרא לצפיפות ההספק בתוך הסיב I_0 , חשב את ההספק הכולל שמועבר ע"י הסיב אם נתון כי הקוטר של הסיב הוא D .
3. הנח כי לאחר צימוד הסיב שבשאלה 2 למקור וקבלת ההספק שנזכר בשאלה הקודמת, האור בוקע מהצד השני של הסיב בזווית ששווה למפתח הנומרי של הסיב NA . מצמידים למוצא של הסיב הנתון סיב אחר מאותו סוג עם אותו קוטר. שני הסיבים צמודים זה לזה. חשב ההפסדים הנגרמים עקב הזזת מרכז הסיב השני ביחס למרכז ראשון במרחק- x . רשום את התלות של ההפסדים במקרה זה עם המרחק x מנורמל לרדיוס הסיב. העזר בגרפים.
4. לוקחים אותם הסיבים כמו בשאלה 2 ו-3. עכשיו מניחים את הסיב השני בדיוק במרכז מול הסיב הראשון אבל מרחיקים אותו מרחק y מקצה הסיב הראשון. חשב ההפסדים שמתקבלים עקב Separation misalignment. רשום ההפסדים שנתקבלו כפונקציה של המרחק y מנורמל לרדיוס הסיב. העזר בגרפים.

5. שוב לוקחים את אותם שני הסיבים שבשאלות הקודמות. הפעם מניחים את המרכזים בדיוק אחד מול השני, שני הקצוות של שני הסיבים צמודים זה לזה אבל יוצרים זווית פתיחה בין שני המפתחים של שני הסיבים כמתואר באיור 6.4c. קרא לזווית הפתיחה בין שני משטחי הסיבים ב- θ וחשב ההפסדים שנגרמים עקב Angular misalignment כפונקציה של הזווית θ . רשום ההפסדים כפונקציה של הזווית $\sin \theta$ מגורמלת למפתח הנומרי של הסיב.
6. האם צפויים הרבה Cladding modes או מעט כאלה כאשר החיתוך של הסיב בקצה הרחוק הוא טוב? הסבר.

7.6 - מהלך הניסוי

הציוד הנדרש:

6.4 PARTS LIST

Cat#	Description	Qty.
F-MLD	100/140 MM Fiber, 50 m	1
R-30025	1.5 mW HeNe Laser	1
ULM-TILT	Laser Mount	1
340-RC	Rod Clamp	1
41	Short Rod	1
F-CL1	Fiber Cleaver	1
1918-C	Power Meter	1
918D-SL-OD3	Low Power Detector, Silicon	1
818-FA2	Bare Fiber Holder Mount	1
FP3-FH1	Bare Fiber Holder	1
F-916	Fiber Coupler (without lens)	1
FPH-S	Fiber Chuck	3
M-20X	20X Objective Lens	1
FK-BLX	Allen Wrench Set	1
TA-8Q20	Thread Adapter, 1/4-20 to 8-32	1
SK-25A	Screw Kit, 1/4-20	1
SK-08A	Screw Kit, 8-32	1

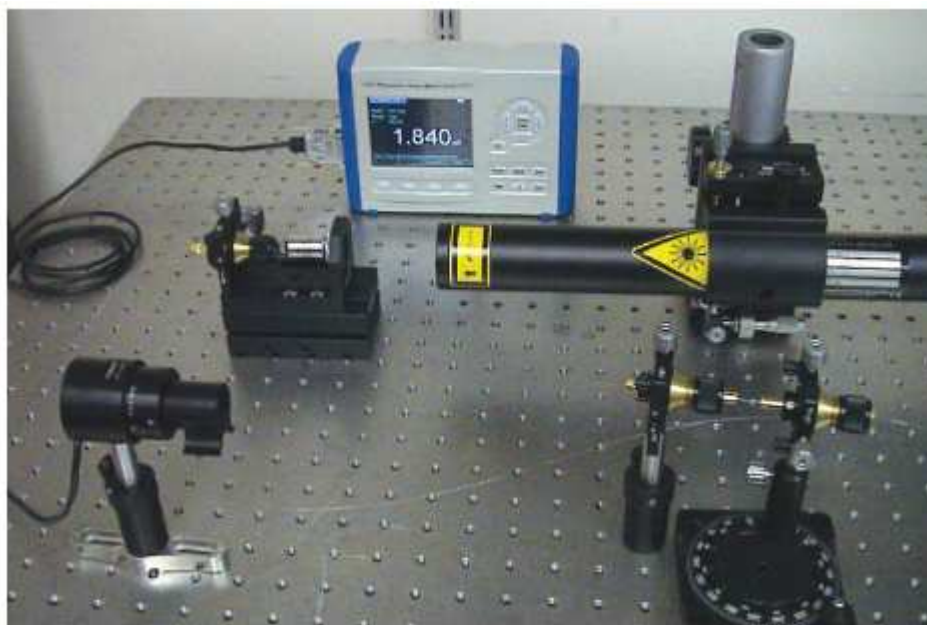
RSP-2T	Rotation Stage, 2"	1
VPH-2	Post Holder, 2"	2
SPV-2	Post, 2"	2
FP-1A	Fiber Positioner	2
FM-1	Mode Scrambler	1
F-CC-140	Connector Halves	1
F-MA-SM-SM	SMA-Mating Adapter	1
05657-00	Epoxy	1
F-TK1L	160 Lapping Sheets	1
F-TK1P	Polishing Fixture	1
F-SK-SA	Splice Kit	1
F-STR-175	Fiber Stripper	1
FPH-J	Fiber Chuck	1
IMIC-1	Fiber Inspection Microscope	1
RSA-2TI	Solid Insert (included in RSP-2T)	1

Additional equipment required: Sheet of plate glass for use in polishing connectors. Toothpick for applying epoxy.

הערה: מומלץ להשתמש במשטח זכוכית ישר לשפשוף הקצוות של הסיבים, ובאצטון כדי לנקות את הקצוות. השפשוף והניקוי משפיעים בצורה משמעותית על תוצאות המדידות בניסוי.

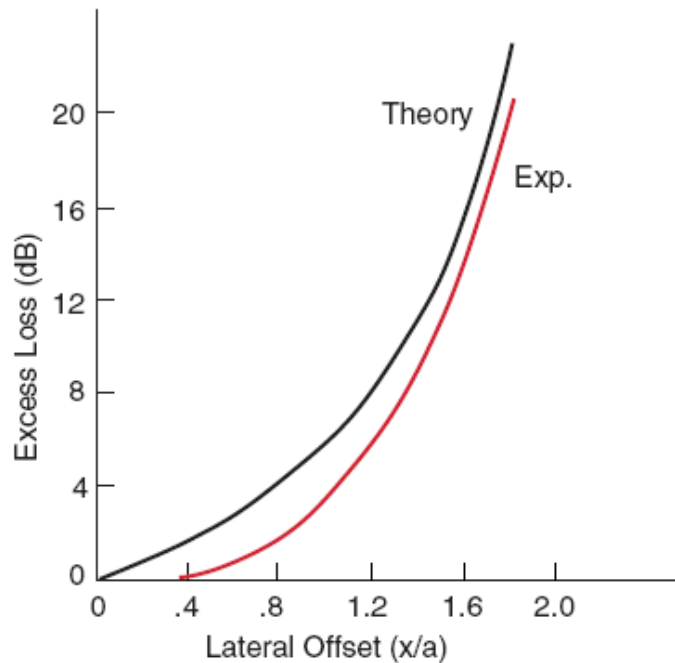
7.6.1 - צימוד בין שני סיבים ללא מחברים

1. חתוך שני מקטעים של סיבים (1-2 מטר) כל אחד מסוג F-MLD, דאג שהחיתוך יהיה ישר ככל הניתן. צמד אחד משני הסיבים שהכנת ללייזר והצד השני של אותו סיב למד הספק באמצעות הרכיבים FP-1A & FPH-S. מדוד ההספק שאתה מקבל בצד זה ע"י מד ההספק. (עליך להגיע להספק של יותר מ- 1 מיליואט).
2. הכנס הקצה הראשון של הסיב השני שהכנת לתוך מחזיק FPH-S ומקם אותו בתוך FP-1A Fiber positioner, שכבר מוכן ומוחזק באמצעות RSP-2T Rotation stage (איור 7.8). הקצה השני של סיב זה הכנס ל- FP-1A כך שההספק שמתקבל מצימוד שני הסיבים יהיה ניתן למדוד באמצעות מד ההספק.
3. הצב שני הסיבים אחד מול השני (Butt Coupling). כדי לעשות זאת ניתן להשתמש ב- SPV-3 post והצבתו בחור שנמצא במרכז RSP-2T Rotation stage בעזרת בורג 8-32 שמופנה מעלה כלפי הסיב. המרכז של שני הסיבים יכול להיבדק ע"י כך שמביאים את שניהם למרכז ומוודאים שהקצוות שלהם לא זזים אחד ביחס לשני כשמסובבים את ה- Rotation stage. כוון את שני הסיבים בשלושה הכיוונים XYZ כך שתקבל מקסימום הספק במד ההספק.
4. מדוד ההספק שמתקבל בצד השני של הסיב השני. חשב מתוך המדידה את ההפסדים שנגרמו מהיישור שעשית עד כה ע"י שימוש בקריאה הראשונה מהקצה של הסיב הראשון ומהקריאה השנייה שקיבלת מהקצה השני של הסיב השני. הפסדים של פחות מ- 0.25 dB נחשבים לתוצאה מצוינת. (אתם תקבלו יותר מזה, בגלל חיתוך לא אידיאלי)



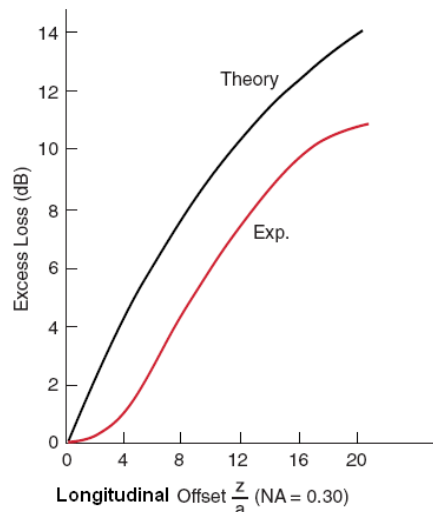
איורים 7.8 – תיאור למערכת הניסוי

5. מדוד את יתר ההפסדים כתוצאה מ- Lateral misalignment לפי השלבים הבאים: מדוד את ההפסדים שמתקבלים ממדידת ההספק מהצד השני של הסיב השני כפונקציה של התזוזה הרוחבית של אחד מהסיבים (זה שאינו מחובר ל- Rotation stage). לאחר שמקבלים ההפסדים הנ"ל, החסר את המדידה שלך מצעד 4 בכך מקבלים את ההפסדים שנגרמו עקב ה- Lateral offset. אין דרך לדעת בצורה ישירה את התזוזה הרוחבית של הסיב. לשם כך ניתן להשתמש בנתונים של הבורג הצדדי של FP-1A, סיבוב שלם של אותו בורג נותן תזוזה של 0.0125 אינץ' או 0.3175 מ"מ. הזז בכיוון אחד, אם מעוניינים לתזוזה בכיוון השני חזור למצב ההתחלתי והזז בכיוון הרצוי. הצג גרף של ההפסדים כפונקציה של התזוזה מנורמלת לרדיוס של הסיב. איור 7.10 מראה את ההפסדים שנמדדו לסיב זה, הסבר מהו מקור ההבדלים בין המדידה לתיאוריה בגרף הנתון.
6. חזור למצב ההתחלתי, ומדוד את ההפסדים כפונקציה של תזוזה אורכית Longitudinal misalignment. הבורג שנמצא מאחורה ל- FP-1A נותן תזוזה זו כאשר סיבוב אחד של הבורג נותן 0.3175 מ"מ תזוזה אורכית. נרמל את התזוזה האורכית לרדיוס הסיב והצג את ההפסדים כפונקציה של הערך המנורמל. תוצאת מדידה שכבר נעשתה מוצגת באיור 7.11. הסבר את מקור השוני עם תוצאת הגרף התיאורטי 7.6.

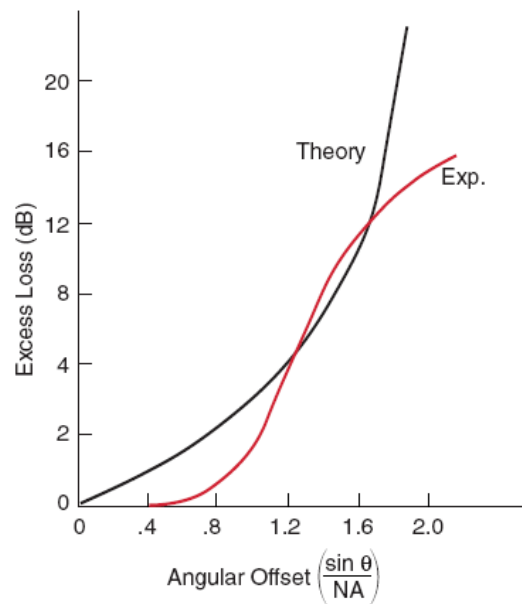


איור 7.10 – תוצאות ניסוייות ותיאורטיות של הפסדים במנגנון של הזזה רוחבית

7. החזר את הסיבים למצב ההתחלתי, מדוד ההפסדים העודפים כתוצאה מ-Angular misalignment ע"י שימוש ב-RSP-2T Rotation stage כדי לסובב את הקצוות של הסיבים אחד ביחס לשני. נרמל הזוויות בהן אתה מודד את ההפסדים למפתח הנומרי של הסיב וצייר גרף להפסדים כפונקציה של ערך מנורמל זה. באיור 7.12 מתוארים ההפסדים שנמדדו במעבדה מול החישוב התיאורטי שניתן באיור 7.7. עבור זוויות קטנות, הסטייה של המדידה מהחישוב התיאורטי נגרמת מאותן סיבות שנזכרו מקודם. עבור זוויות גדולות, חלק מהאור נקלט ע"י המעטה של הסיב השני דבר שמקטין את ההפסדים.



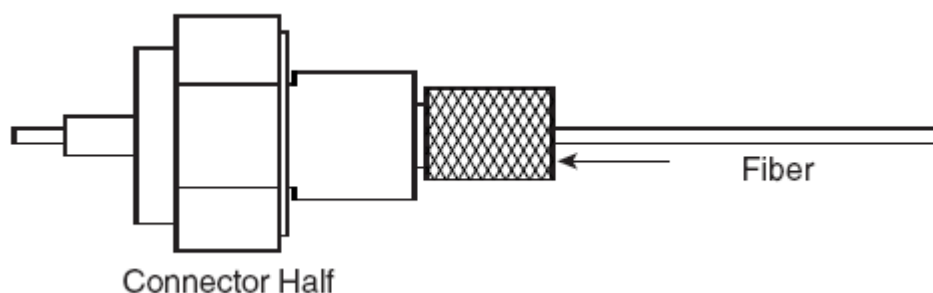
איור 7.11 – תוצאות ניסיוניות ותיאורטיות של הפסדים במנגנון של הזזה אורכית



איור 7.12 – תוצאות ניסיוניות ותיאורטיות של הפסדים במנגנון של הזזה זוויתית

7.6.2 - הכנת חיבור עם Connectors ובדיקת ביצועיו

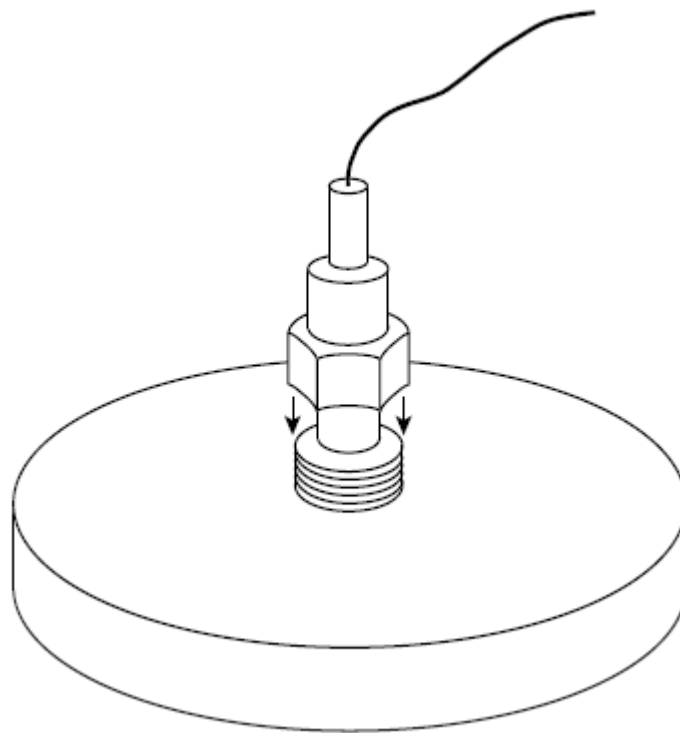
1. שני קטעי הסיבים שהכנת בחלק הראשון של הניסוי יכולים לשמש בחלק זה של הניסוי. כלף את הקצוות של שני הסיבים כך שיישאר מכל צד 6-8 מ"מ של סיב חשוף בקצה, החלק הזה יוכנס לתוך ה- Connector בהמשך.
2. אזכרה- יש לשים לב כי חומר האפוקסי המצורף מתייבש במהירות, לכן יש לוודא כי כל הרכיבים מוכנים לביצוע החיבור לפני הכנת החומר. ערבב כמות קטנה של החומר 05657-00 two-part Epoxy על משטח נקי (לא על השולחן האופטי) עם קסם שיניים, ערבב שני חלקי החומר היטב.



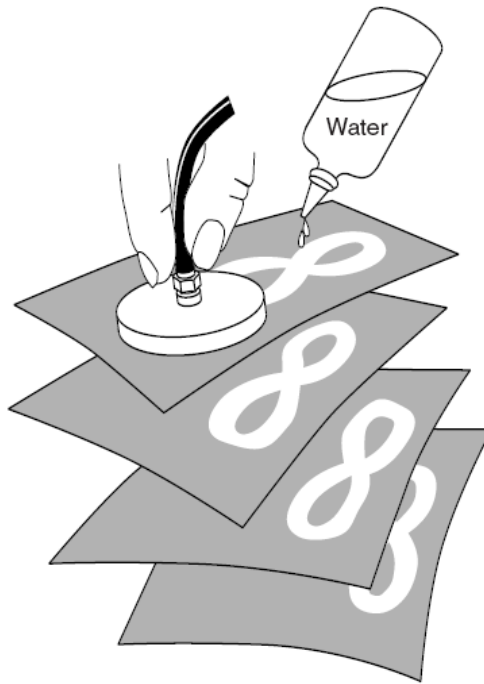
איור 7.13 – חיבור סיב למחבר אופטי

3. מרח מעט מהחומר שהכנת עם קסם השיניים לאורך כל הקצה החשוף של הסיב.
4. החדר את הסיב שמרוח עם החומר לתוך המחבר (ה- Connector Half), ניתן ע"י סיבוב קל להקל את כניסת הסיב לתוך תעלת המחבר. המחברים מיועדים לחיבור סיבים עם בידוד פלסטי (סיבים תעשייתיים הם בעלי מעטה פלסטיק עבה), לכן הוסף מחומר ההדבקה לתוך חלל המחבר כדי לקבע את הסיב בתוכו ולפצות על העדר מעטה זה.

5. באמצעות הקסם שיש לך, מרח טיפה של חומר ההדבקה על הקצה של הסיב שיוצא מהחור הקדמי של ה-Connector. תן למערך המחבר שהכנת עם החומר להתייבש (זה לוקח כ-5 דקות) בינתיים ניתן להכין את הסיב השני עם עוד חצי Connector בצורה דומה לחלוטין למה שעשית מקודם.
6. וודא כי ה-Polishing fixture נקי ומוכן לשימוש (דסקית עגולה מתכתית). אם היא לא נקייה, קח בד אופטי נקי ונקה אותה עם מים. הכן משטח זכוכית ישר ונקי לביצוע פעולת השפשוף.
7. הנח נייר שפשוף של $60\mu m$ על משטח הזכוכית (הוספת כמה טיפות מים מתחת לנייר על הזכוכית גורמת להגדלת מתח הפנים, ולנייר לא לזוז). הדק את המחבר לדסקית (באמצעות ההברגה שעל ה-Connector), שים לב שאינך מהדק יתר על המידה, ראה איור 7.14.
8. הוסף שפריץ קטן של מים על נייר ההשחזה, והתחל בביצוע פעולת ההשחזה בצורת מסלולים דמויי 8 כפי שמופיע באיור 7.15. בצורה זו ניתן לבצע השחזה גם עם הניירות האחרים. התמד בפעולה זו עד שהבליטה של ה-אפוקסי תיעלם, הפעל לחץ מתון על דסקית ההשחזה. אחרי 20-30 חזרות תרגיש בהגברת החיכוך בין דסקית ההשחזה לבין המשטח, זה מעיד על כך שהבליטה נעלמה ושטח החפיפה בין הדסקית לנייר גדל.



איור 7.14 – מחבר אופטי המחובר לדסקית החלקה



איור 7.15 – פעולת ההשחזה של קצה הקונטור

9. שטוף היטב את דסקית ההשחזה עם מים וייבש היטב כדי לא לצבור לכלוך בין שלבי ההשחזה השונים. בד"כ תוצאה גרועה של משטח סיב מתקבלת עקב ביצועים לקויים בפעולה זו של הניסוי. וודא לעשות זאת בכל שלב בין פעולות ההשחזה.
10. כעת השתמש בנייר בעל מידה $9\mu m$, זו תהיה הפעולה האמצעית. בצע שפשוף בצורת שמיניות במשך של 20-30 סיבובים כאלה. אל תשכח לנקות היטב אחרי פעולה זו.
11. חזור על פעולה 10 עם הנייר של $1\mu m$ ואחר כך עם הנייר $0.3\mu m$, אל תשכח לבצע את הניקוי המתאים בין כל השלבים.
12. ניתן לצפות במשטח הסיב שקיבלתי באמצעות המיקרוסקופ IMIC-1.
13. לאחר ששני החצאים של הסיבים מוכנים, הדק באמצעות ההברגה את שני החצאים ע"י הרכיב F-MA-SM-SM.
14. צמד צד אחד של הסיב ללייזר, מדוד ההספק שמתקבל בצד השני של הסיב לפני ה-Connector, הדק את המחבר ומדוד ההספק שמתקבל בצד השני של הסיב השני. חשב מתוך מדידה זו את ההפסדים ב-Connector.
15. ההפסדים ב-Connector תלויים בצורת התפלגות האור לאורך הגרעין של הסיב. אם רוב האנרגיה מרוכזת מסביב לגרעין אז ההפסדים יהיו קטנים מאוד. אם ההספק מפוזר יותר על אזורים שרחוקים ממרכז הגרעין, נקבל רגישות יותר גבוהה להפסדי יישור. השתמש ב-FM-1 Mode scrambler כדי לייצר בקירוב התפלגות יציבה של המודים בתוך הגרעין. במצב זה נקבל בערך את ההפסדים שמתקבלים בשימושים פרקטיים.

7.6.3 - חיבור סיבים באמצעות Splices ובדיקתם

1. הכן שני קטעים חדשים של הסיב F-MLD (1 מטר כל אחד).
2. הוצא את החבילה של ה- Splices מהקיט, מצורפים שני מפתחות כדי לפתוח ה- Splice, הוראות השימוש מצורפים גם כן לערכה. התייעץ עם המדריך כדי לקצר את הזמן.
3. כלף שני הצדדים של הסיבים, צמד צד אחד של הסיב הראשון ללייזר באמצעות המתקן F-916 Fiber coupler, כפי שעשית בתחילת הניסוי.
4. מדוד ההספק שאתה מקבל בצד השני של הסיב הראשון ורשום לך את התוצאה. עקוב אחרי ההוראות כדי לצמד שני הסיבים אל תוך ה- Splice כך ששניהם יגיעו אל אמצע התעלה שנמצאת בתוך ה- Splice. מדוד ההספק שמתקבל מהצד השני של הסיב השני. המדידה תיתן לך אינדיקציה טובה לגבי טיב החיתוך של הסיבים. אם קיבלתי הפסדים של יותר מ- 0.5 dB, זה מצביע על כך שהסיבים לא נחתכו היטב. הגורם השני המשמעותי שגורם להפסדים ב- Splices הוא נושא המרכז של הסיבים אחד מול השני. אם ע"י סיבוב ניתן לשפר את תוצאת המדידה, זה מצביע על מרכז לקוי. אם למרות הסיבוב של הסיבים התוצאה לא משתנה הוצא שוב את הסיבים, חתוך שוב וחזור על המדידה.
5. ההפסדים בחיבור Splices רגיש מאוד לצורה שבה האור נכנס לסיב. השתמש ב- FM-1 Mode Scrambler כדי לקבל בקירוב התפלגות של אופן יציב וחזור על המדידה כפי שעשית בסעיף 15 בחלק של ה- Connectors.
6. לשיפור המקצועיות של הסטודנט, הינכם מוזמנים לבצע חיבור Splices עם סיב חד אופן של ניסוי 4. (סעיף רשות) ב- Single mode fiber הפסדים של 0.5 dB הם תוצאה טובה יחסית.

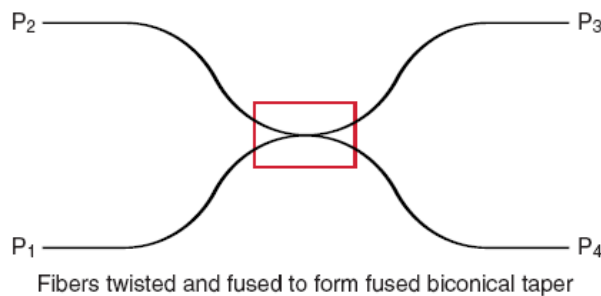
ניסוי 8 - מפצלים בתקשורת אופטית

8.1 - הקדמה

בניסוי זה נכיר חלק מהרכיבים הדרושים לבניית מערכת תקשורת אופטית. בניסוי זה נמקד את הדיון בהכרת מפצלים אופטיים במערכות תקשורת. רכיבים אופטיים להפצת מידע הם בעלי חשיבות רבה הן בתקשורת למרחקים קצרים, קרי רשתות מקומיות (LAN's) והן ברשתות לתקשורת רחוקה שם מנצלים את רוחב הסרט הגדול של המערכת. היבט חשוב כיום בתכנון מערכות תקשורת אופטית הוא מזעור ושילוב ברמת המערכת עצמה. כתוצאה ממאמץ זה, מאפיינים רבים של המערכת הולכים ומשתפרים כגון: נפח פיזי קטן, משקל זעיר, צריכת הספק קטנה ואמינות גבוהה. למרות שהרבה רכיבים כבר פותחו בנושא זה, בניסוי זה נתמקד רק הרכיב אחד חשוב - המפצל הדו כיווני לסיבים רב אופניים. למעשה בניסוי זה יתאפשר לסטודנט להכיר כמה מהמאפיינים הכי חשובים של מערכת תקשורת אופטית בפרט - הפסדים כתוצאה מפיצול, כיוונויות, ערב דיבור (Crosstalk) ויחס פיצול.

8.2 - רקע תיאורטי

הצורך בפיצול אור מסיב בודד לשני סיבים או משני סיבים שונים לסיב אחד בודד זוהה כבר בתחילת הדרך של תקשורת בסיבים אופטיים. מפצל 2×2 (2 כניסות- 2 יציאות), דו-כיווני שמתואר באיור 8.1 משחק תפקיד כמו מפצל קרן באופטיקה קוונציונלית או רכיבי T-taps באלקטרוניקה. מפצלים רב כיווניים משחקים תפקיד חשוב ביותר במערכות תקשורת עם קצבי שידור גבוהים, במקרה הכללי מפצל הוא $n \times n$ (n כניסות- n יציאות) הפועלים לפי אותו עקרון פעולה משמשים לפיצול אינפורמציה ברשתות מסוג מבנה כוכב.

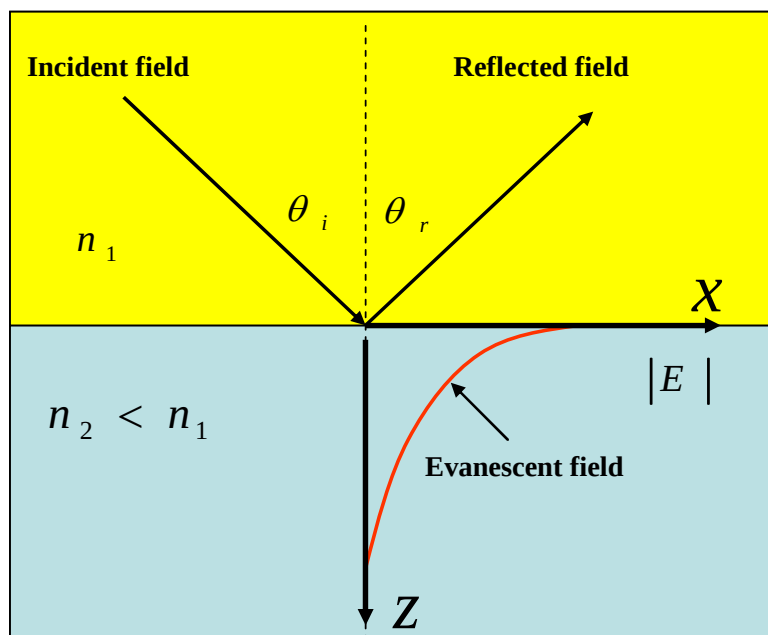


איור 8.1 – מפצל אופטי 2×2 דו כיווני

ברמה העקרונית, ניתן למיין את המפצלים האופטיים לשתי קטגוריות: הראשונה בה משתמשים במפצל אופטי קלאסי Beam Splitter, והקטריגוריה השנייה שבה מצמידים אור מסיב אחד לאחר ע"י ניצול התכונה של התפלגות **השדה החולף (Evanescent field)** במעטה הסיב הראשון והחפיפה של שדה זה עם המעטה של הסיב השני שמוצמד פיזית לסיב הראשון. למרות שרכיבים רבים המבוססים על הקטגוריה הראשונה פותחו לאחרונה, השימוש בהם עדיין מוגבל ואינו רחב בגלל דרישות הכיול והכוונון הקשות להפעלת מערכות אלו.

היתרון הבולט של מפצלים הבנויים על עקרון Beam Splitters הוא בשימור האופן שנושא הסיב הראשון כאשר הוא מועבר לסיב השני.

שדה חולף (Evanescent Field) הינו שדה אלקטרומגנטי שנוצר על הגבול בין שני חומרים כתוצאה מהחזרה מלאה. כאשר האור עובר מתווך בעל מקדם שבירה גבוה לתווך אחר בעל מקדם שבירה נמוך וזווית הפגיעה היא גדולה מהזווית הקריטית מתקבלת החזרה מלאה, בה כל האנרגיה של השדה הפוגע מתפשטת בחזרה לתווך ממנו באה.



איור 8.2 – שדה חולף (Evanescent field) בהחזרה מלאה

כפי שניתן לראות באיור 8.2, כאשר זווית הפגיעה גדולה מהזווית הקריטית $\theta_i > \theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

מתרחשת החזרה מלאה לקרן הפוגעת. ניתוח לפי תורת הגלים מראשה כי למרות ההחזרה המלאה קיים שדה אלקטרומגנטי בתווך השני בעל עצמה מכסימלית על הגבול בין שני החומרים ודועך בצורה אקספוננציאלית חזקה לתוך התווך השני. מכיוון שמרחק החדירה Penetration depth לשדה זה בתוך התווך השני הוא מאוד קטן, אין מעבר אנרגיה לתווך השני, ולכן מקדם ההחזרה במקרה זה נשאר אחד וכל האנרגיה הפוגעת חוזרת.

מרחק החדירה של השדה $d_p \equiv \frac{1}{|k_z|}$ לתוך התווך השני n_2 ניתן לחישוב ע"י מספר הגל בכיוון Z באותו חומר.

כאשר:

$$k_z = k_2 \cdot \cos \theta_t$$

$$\text{and from snell law ; } \sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \quad (1)$$

במקרה של החזרה מלאה ומעל הזווית הקריטית מקבלים ש- $\theta_i > \theta_c \rightarrow \sin \theta_i > \sin \theta_c = n_2 / n_1$ ולכן

$$\sin \theta_i = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i > 1$$

כשדה עם חזית גל מישורית ווקטור גל k_z בכיוון זה:

$$E = E_{0,z} \exp[i(k_z z - \omega t)] \quad (2)$$

ניתן מתוך משוואה (1), לחשב את k_z לפי:

$$\begin{aligned} k_z &= k_2 \cdot \cos \theta_t = \frac{\omega}{c} n_2 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} \\ &= \frac{\omega}{c} n_2 \cdot \sqrt{-1} \cdot \sqrt{\sin^2 \theta_t - 1} = i \cdot \frac{\omega}{c} n_2 \cdot \sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 \theta_i - 1} \\ \text{hence,} \\ E &= E_{0,z} \exp[i(k_z z - \omega t)] = E_{0,z} \exp(-i\omega t) \exp(ik_z z) \\ E &= E_{0,z} \exp(-i\omega t) \exp\left(i^2 \cdot \frac{\omega}{c} n_2 \cdot \sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 \theta_i - 1} \cdot z\right) \\ E &= E_{0,z} \exp(-i\omega t) \exp\left(-\frac{\omega}{c} n_2 \cdot \sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 \theta_i - 1} \cdot z\right) \\ E &= E_{0,z} \exp(-z/d_p) \exp(-i\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

ע"י הצבת $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, ניתן לחשב את התלות של עומק החדירה באורך הגל של הקרינה הפוגעת (עומק החדירה

מוגדר לפי המרחק שבו אמפליטודת השדה יורדת ל- $1/e$ מערה המרבי).

עבור שני סיבים סמוכים, מתקבלת חפיפה בין התפלגות האנרגיה בשני הסיבים, לכן ניתן ע"י שימוש בשדה החולף EF במעטה של הסיב הראשון להעביר אנרגיה לסיב השני (טכניקת EF לצימוד בין סיבים). מכיוון שאופנים בעלי סדר גבוה מתאפיינים במרחק חדירה גדול יחסית, האופנים שמתפשטים בזווית קרובה לזווית הקריטית מקרינים יותר אנרגיה לתוך המעטה של הסיב ושיטה זו הופכת להיות מאוד תלויה בהתפלגות המודים בתוך הסיב. אם האנרגיה הכלואה בסיב הראשון נמצאת באופנים הגבוהים, ניתן להעביר הרבה אנרגיה לסיב השני באמצעות שיטה זו, מאידך, אם האנרגיה בסיב הראשון נמצאת ברובה באופנים הנמוכים ניתן להעביר מעט אנרגיה בין הסיבים באותה שיטה. ניתן באמצעות מפצלים המבוססים על שיטה זו לקבל יחס צימוד קבוע כאשר האנרגיה מפולגת באחידות בין האופנים. בחזרה לאיור 8.1, אם נניח כי האור בא במקור מסיב מס' 1, נקבל במוצא של סיב 3 יותר אנרגיה מהאופנים בעלי סדר גבוה ואילו במוצא מס' 4 נקבל יותר אנרגיה מהאופנים בעלי סדר נמוך. זאת משום שהאור שעובר להדק 3 בא בעיקר מ- EF של סיב 1 ואילו האור בהדק 4

הוא למעשה בא ממעבר ישיר של האור המלוכד במרכז הסיב הנושא (מס' 1) שמורכב מהאופנים הנמוכים בסיב.

לפעמים כאשר מחברים עוד מפצלים אחד אחרי השני (cascading), אין המרחק בין המפצלים מספיק כדי שהאופנים שהתקבלו מהמפצל הראשון יבצעו התפלגות חדשה לפני שהם מתפצלים שוב במפצל הבא. דבר שיכול להשפיע על הביצועים של רשת התקשרות שבה יש מספר רב של מפצלים. מכיוון שבהדק 3 נקבל יותר אופנים בעלי סדר גבוה, בהמשך אם נרצה לפצל שוב האור בהדק זה לעוד הסתעפויות נקבל אחרי הפיצול השני הספק שגבוה מההספק האופייני. לעומת זאת, בהדק מס' 4 ישנם בעיקר אופנים בעלי סדר נמוך ולכן אם נרצה לפצל האור מהדק זה שוב, נקבל לאחר הפיצול הספק שנמוך מההספק האופייני הדרוש בפעולת הפיצול.

בגלל שה- EF הוא בעל מרחק התפשטות קטן במעטה של הסיב, קיים צורך להביא את שני הסיבים שרוצים לצמד ביניהם למרחק מספיק קטן (סמוכים) כדי לקיים את התנאי לחפיפה בין שני השדות בשני הסיבים. הדרך הכי נפוצה לקיים זאת היא ע"י היתוך שני הסיבים ביחד כשהם שזורים ביניהם, שיטה זו נקראת Fused bi-conical taper technique. תוך כדי ההיתוך בטמפרטורה שמגיעה עד כ- 1500°C מותחים שני הסיבים ביחד כדי להגביר את הקרבה ביניהם. יעילות ההצמדה גבוהה בשיטה זו בגלל שני גורמים: הראשון, בגלל המתיחה וההיתוך - שתי הליכות של שני הסיבים נעשות יותר דקות ובכך מגדילים את אזור החפיפה בין השדות החולפים EF בשני הסיבים (המרחק בין שתי הליכות קטן). השני, שוב בגלל שהליכה נעשית דקה יותר ה- V-number של הסיב נעשה קטן יותר ולכן קצב הדעיכה של השדה החולף EF בסיב נעשה מתון יותר, דהיינו עומק החדירה של השדה גדל יותר ולכן אזור החפיפה בין שני השדות בשני הסיבים נעשה רחב יותר. מעשית, פעולת המתיחה שנעשית תוך כדי ההיתוך היא רציפה עד לקבלת יחס הצימוד הדרוש. כאשר ההיתוך מופסק, המרחק בין שתי הליכות מתייבב (מקבעים אותו) ונעשה קבוע ולכן מפצלים שמיוצרים בטכניקה זו אינם רגישים לשינויי טמפרטורה.

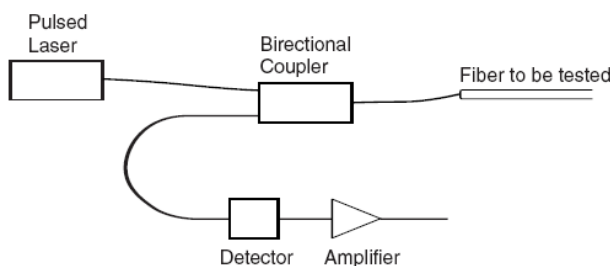
אם נתייחס למפצל הדו-כיווני שמופיע באיור 8.1, חלק מהאור שמגיע מסיב מס' 1 ממשיך להתפשט באותו סיב ויוצא מהדק 4, החלק השני מועבר ע"י הטכניקה של EF לסיב השני וממשיך להתפשט קדימה. קיים חלק שלישי של ההספק המקורי שבא מסיב אחד שחוזר דרך ההדק 2 שנוצר בעיקר מפזור אחורי והחזרות מאזור החיבור של שני הסיבים. **יחס צימוד** Coupling Ratio הוא היחס בין ההספק שמועבר לסיב השני P_3 לבין סה"כ הספק שעבר דרך המפצל $P_3 + P_4$, דהיינו ההגדרה המתמטית של יחס הצימוד תהיה
$$CR \equiv -10 \log \left(\frac{P_3}{P_3 + P_4} \right)$$
 ערכים אופייניים של יחס זה במפצלים מסחריים הם $3\text{dB}(50\%)$, $10\text{dB}(10\%)$, $16\text{dB}(25\%)$ בהתאם לתכנון מוקדם.

נגדיר המושג "**הפסדים עודפים**" Excess Losses כיחס בין סה"כ הספק יוצא מהמפצל לבין סה"כ הספק נכנס למפצל $EL \equiv -10 \log \left(\frac{P_3 + P_4}{P_1} \right)$. בתחילה מפצלים אופטיים היו עם הפסדים של כ- $2-3\text{dB}$, כיום ניתן להגיע להפסדים של כ- $0.5-1\text{dB}$. **כיווניות** Directivity של המפצל מוגדרת כיחס ההספק שחוזר מהסיב השני (סיב 2) אחורה מסה"כ הספק שנכנס בסיב הראשון $D \equiv 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$. כיווניות אופיינית

למפצלים איכותיים היא כ- $-40dB$. גודל חשוב נוסף הוא ההספק החוזר אחורנית לתוך סיב המקור (סיב

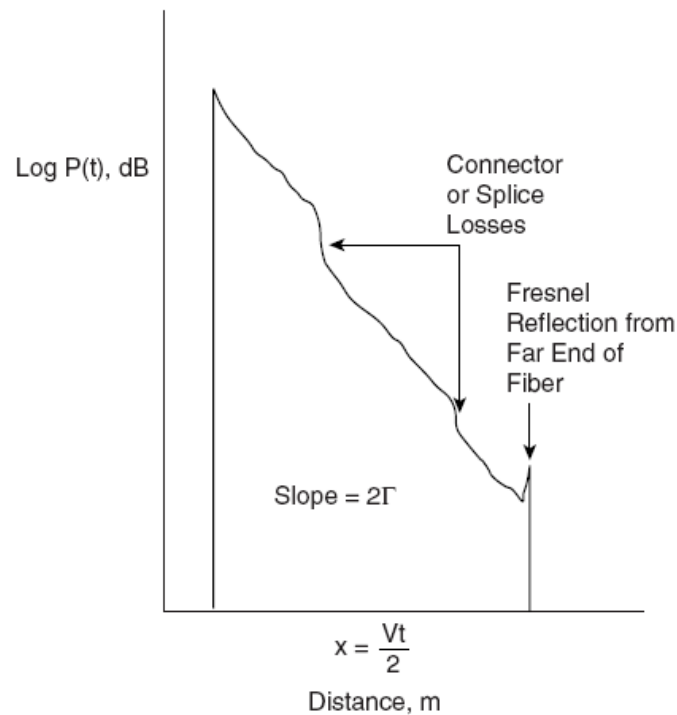
$$(1). \text{ גודל זה מכונה הפסד החזרה Return Loss והוא מוגדר לפי } RL \equiv -10 \log \left(\frac{P_1 - (P_3 + P_4 + P_2)}{P_1} \right)$$

בנוסף לשימוש במפצלים אופטיים לפיצול מידע בערוצי תקשורת וטעינת מידע לפס, הם משמשים ל- OTDR's- Optical time domain reflectometers למדידת הפסדים במערכות סיבים אופטיים (למעשה ההתקן משמש למציאת מיקומו של נתק ברשת התקשורת). OTDR הוא מערכת מכ"ם חד ממדית שמספקת סקירת הדים לכל אורך הסיב (ראה איור 8.3). עקרון הפעולה של ההתקן מבוסס על העברת פולסי לייזר מחזוריים באמצעות דיודת לייזר לקצה אחד של הסיב הנמדד ומדידת האור שמפוזר אחורנית מאותו נתק של הסיב כפונקציה של הזמן.



איור 8.3- תאור סכמטי של OTDR המחובר למפצל אופטי

האות המוחזר מאותו קצה של הסיב משמש כדי לאתר את מיקום האי רציפויות בסיב (מאחר ומהירות האור בסיב ידועה, הרי שבאם נתון זמן המעוף של הפוטונים מרגע השידור ועד לרגע הקליטה ניתן לחשב את המרחק ולאתר את מיקום התקלה). המפצל הדו-כיווני מנתב את הפולס היוצא מה- OTDR לתוך הסיב הנבדק ומנתב את האור המפוזר אחורנית לגלאי. ניתן לתאר את ההספק המתקבל בגלאי בתלות בזמן ולקבל גרף מוצא אופייני של OTDR (ראה איור 8.4). השיפוע של הגרף הוא פעמיים מקדם הניחות של הסיב (עד כדי מינוס). פגמים בסיב כמו מחברים, Splices וסדקים נראים כהפרעות בעוצמת האור החוזר לגלאי.



איור 8.4 – אות המוצא של OTDR

8.3 - שאלות הכנה

1. השתמש במשוואות (1)-(3) כדי לרשום עומק החדירה d_p כפונקציה של אורך הגל, זווית הפגיעה, ומקדמי השבירה של שני החומרים.
2. נתון $\theta_i = 60^\circ$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $n_2 = 1$, $n_1 = 1.5$, חשב עומק החדירה של הקרינה הפוגעת לתוך השני.
3. הסבר איך ניתן להשתמש בתכונה של Evanescent field בסיבים אופטיים כדי לצמד אור בין שני סיבים סמוכים.
4. הסבר איך שיטה זו של צימוד (פיצול) תלויה באופנים שמתפשטים בתוך הסיב. הראה באופן אנליטי כיצד אופנים מסדר גבוהה יהיו בעלי עבירות גבוהה יותר (לסיב השכן) במפצל כזה.
5. הסבר איך מייצרים מפצל דו-כיווני. מהו השיקול העיקרי בייצור התקן זה?
6. הסבר איך הטכניקה של הייצור מגדילה את אזור החפיפה של השדות החולפים EF בשני הסיבים. הסבר איך משפיע ה-V-number על עומק החדירה של ה-EF במעטה של הסיב.
7. הספק כולל של 1 מיליוואט נכנס לסיב אופטי רב אופני MMF. הכיוונויות של המפצל היא -10 dB ויחס הצימוד הוא 50%. חשב את חלוקת ההספקים בין ההדקים השונים של הסיב בהנחה שהפסדי החזרה (RL) זניחים.
8. נתונים שני מפצלים בעלי יחס צימוד זהה. האם ניתן לקבל מנתון זה מידע על הכיוונויות של המפצל?
9. חשב הפסדי החזרה (RL) בסיב בעל כיוונויות של -20 dB והפסדי עודף (EL) של 0.5 dB .

10. ברשותך סיב בעל מקדם שבירה בליבה של 1.45 עבור אורך גל של 1.55 מיקרומטר. מודדים את ההספק החוזר מהסיב באמצעות OTDR פעמיים, בשני זמנים שונים עם מרווח זמן של 50µs. ההספק במדידה השנייה קטן פי שניים מההספק הראשון, מהו מקדם ההפסדים של הסיב (ביחידות של dB/km)? מהו אורך הסיב הנמדד במקטע הזמן הנ"ל? ציין איזה הנחה בצעת.

8.4 - מהלך הניסוי

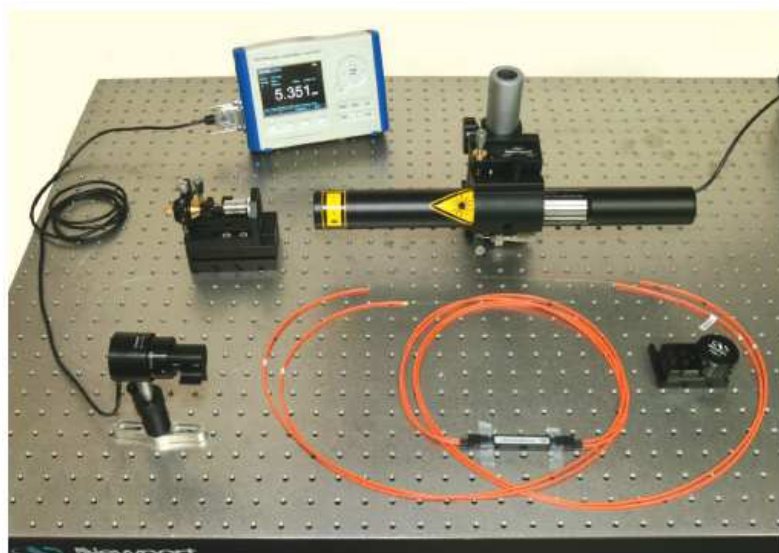
הציוד הנדרש לניסוי

Cat#	Description	Qty
F-MLD	100/140 MM fiber, 50 meters	1
R-30025	1.5 mW HeNe Laser	1
ULM-TILT	Laser Mount	1
340-RC	Rod Clamp	1
41	Short Rod	1
F-CL1	Fiber Cleaver	1
1918-C	Power Meter	1
918D-SL-OD3	Low Power Detector, Silicon	1
818-FA2	Bare Fiber Holder Mount	1
FP3-FH1	Bare Fiber Holder	1
F-916	Fiber Coupler (without lens)	1
FPH-S	Fiber Chuck	6
M-20X	20X Objective Lens	1
FK-BLX	Allen Wrench Set	1
F-STR-175	Fiber Stripper	1
SK-25A	Screw Kit, ¼-20	1
VPH-2	Post Holder, 2"	2
VPH-3	Post Holder, 3"	2
SPV-2	Post, 2"	2
SPV-3	Post, 3"	2
FP-1A	Fiber Positioner	4
FM-1	Mode Scrambler	1
F-CPL-M22855	Bidirectional Coupler	1
F-SK-SA	Splice Kit	1

- השתמש בסכין כדי להסיר את העטיפה החיצונית של הכבל שמחזיק את התקן המפצל F-CPL-M22855. השאר מכל צד של המפצל כמה סנטימטרים של סיב חשוף (שני סיבים בכל צד). קלף וחתוך את הקצוות של הסיבים שמרכיבים את המפצל הנ"ל. (מהלך זה נעשה מראש ע"י המדריך, אין לבצע שוב).
- הכן קטע באורך של מטר אחד מהסיב F-MLD, קלף וחתוך שני הקצוות של הסיב. בשלב זה של הניסוי, קטע הסיב הקצר שהוכן משמש כדי לצמד את האור מהמקור לתוך המפצל. שלב זה תוכנן כדי להקל את פעולת צימוד האור למפצל.
- השתמש בערכת ה-F-SK-SA mechanical splice, וחבר ע"י ה-Splice קצה אחד של קטע הסיב שהכנת עם הדק מס' 1 של המפצל. ניתן לבצע בדיקה לאיכות הצימוד של מקור האור לסיב עוד לפני חיבור ה-Splice.

4. צמד מקור האור של הלייזר לתוך הקצה השני של קטע הסיב שחיברת ל-Splice. ניתן להגיע עד 1.39 מיליוואט לפני חיבור ה-Splice. (ראה איור של המערכת האופטית בניסוי בסוף התדריך)
5. סדר את צימוד האור לסיב כך שתתקבל עדיפות לסדרים הנמוכים בהתפשטות בתוך הסיב. דבר זה יכול להתבצע ע"י כיוון ומיקום הסיב בעזרת ה-F-916 כדי לקבל בהדק 4 הכתם הכי צר שניתן. בגלל שסדרים נמוכים מתפשטים קרוב יותר למרכז הסיב, ניתן להבחין בכך ע"י התבוננות בכתם היוצא. ניתן לשם כך להשתמש בנייר לבן שיונח על ה-Bread board ולכוון המוצא אליו.
6. מדוד ורשום את ההספקים במוצא כל אחד מההדקים 2, 3, ו-4 בעזרת מד ההספק והגלאי ומחזיק הסיב 818-FA2 and FPH-FH1. המר את ההספקים שמדדת ליחידות dBm ע"י הנוסחה
$$\left[10\log\left(\frac{P}{1mW}\right)\right]$$
 כאשר P הוא ההספק שנמדד במיליוואט.
7. ווסת את תנאי כניסת האור לסיב כך שתקבל העדפה למודים הגבוהים. שוב זה נעשה ע"י כונון מחדש של F-916. מודים גבוהים גורמים לכתם יותר רחב במוצא. מדוד שוב ההספקים שמדדת בסעיף הקודם והמר שוב תוצאת המדידה ל-dBm.
8. **סעיף זה יבוצע אם זמן הניסוי יאפשר זאת.** חזור על סעיף 5 הפעם השתמש ב-FM-1 Mode scrambler כדי ליצור מצב של התפלגות יציבה בתוך הסיב. לפני השימוש ב-FM-1 Mode scrambler וודא כי בכניסה אפשרת קיום מודים נמוכים כפי שעשית בסעיף 5. מדוד שוב ההספקים בהדקים השונים כמו מקודם והמר שוב היחידות ל dBm.
9. מרח כמות קטנה של נוזל מתאם מקדם השבירה (Index matching fluid) על הקצוות 3 ו-4. מדוד ורשום את ההספק שמתקבל בחזרה בהדק 2. הנוזל שמרחת אמור להקטין את החזרת פרנל לקצה מס' 2 מהקצוות 3 ו-4 של המפצל.
10. השווה בין התוצאות של סעיף 6 ו-9. מהם התנאים שהיצרן צריך להוסיף כשהוא רושם שיחס הפיצול הוא 3 דיציבילים והכיווניות היא -40 dB .
11. עבור השלבים 6, 7, ו-8 חשב את ה-Excess loss, Splitting ratio, Directivity ו-Return Loss, כפי שהם הוגדרו בחלק העיוני של הניסוי.

לדו"ח המסכם: תאר את התוצאות שקיבלת, רשום את תוצאות המדידות ואת החישובים שביצעת, הסבר את נושא התלות של ביצועי המפצל בהתפלגות המודים בסיב, הסבר את תוצאות הסעיפים 9 ו-10.



איור 8.5 – מערך הניסוי

ניסוי 9 – מערכת תקשורת WDM

9.1 – הקדמה

בניסוי זה יהיה על הסטודנט לבנות מערכת תקשורת WDM-Wavelength Division Multiplexer ולרלב שני ערוצים אופטיים על פני סיב אחד. לאחר מכן יידרש הסטודנט להפריד את הערוצים ולאפנן אנלוגית את המשדרים שבמערכת. הניסוי דורש שימוש בכלים רבים שנצברו במהלך הניסויים הקודמים.

9.2 – מערכות WDM

באופן עקרוני רוחב הפס של סיב אופטי מאפשר להעביר בו עשרות אלפי Tb/s. ואולם, עד אמצע שנות התשעים לא היה ניתן לעבוד בקצבים גבוהים מ-10 Gb/s בגלל מגבלות ציוד הקצה. עם הפיתוח של ריבוב ערוצים (WDM-ראה איור 9.1) היום ניתן להעביר בסיבים מעל 1 Tb/s כאשר כל אפיק אופטי נושא בערך 10 Gb/s (מעל מאה אפיקים כאלה ניתן לרלב), ולאחרונה אף הצליחו לרלב אפיקים בעלי קצב העברת מידע של 40 Gb/s עם מרווח ספקטראלי בין כל אפיק ואפיק של בערך 50-100 GHz (כ-0.8-0.4 nm סביב 1550nm). החלונות הספקטראליים שעובדים בהם הם 1.3μm ו-1.55μm (בעיקר בתחום 1530-1612nm), כאשר כל חלון כזה הוא בעל רוחב ספקטראלי של 5-10 THz, ולכן מתאים לריבוב של מאות ערוצים עם מרווח ספקטראלי של 100 GHz.

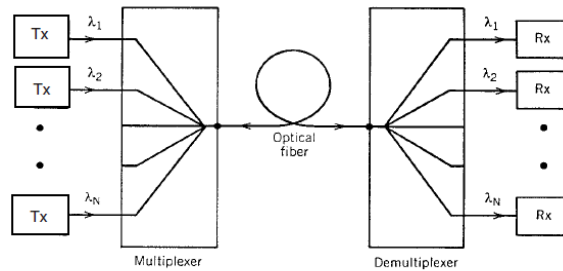


Figure 8.2: Multichannel point-to-point fiber link. Separate transmitter-receiver pairs are used to send and receive the signal at different wavelengths

איור 9.1 – ריבוב ערוצים על פני סיב אחד WDM

במערכות WDM לכל ערוץ משדר משלו, וכל ערוץ מופרד מיתר הערוצים במקלט (בצורה אופטית - ראה איור 9.1). בגלל שרוחב החלון הספקטראלי שפנוי למודולציה הוא מוגבל (לא ניתן להעביר תקשורת בכל אורכי הגל, אורכי גל מסוימים אינם עוברים טוב בסיב), השאיפה במערכות אלה הוא לרלב את הערוצים עם מרווח בין ערוצי צר ככל שאפשר. מגדירים את היעילות הספקטראלית של WDM לפי:

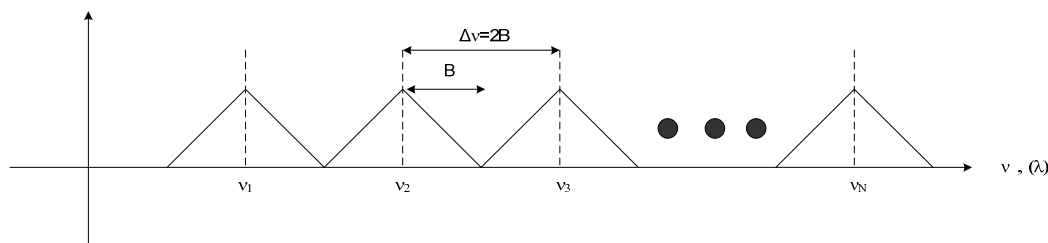
$$\eta_c = B / \Delta \nu_{ch}$$

עם B קצב העברת המידע ו- $\Delta \nu_{ch}$ המרווח הספקטראלי בין ערוץ לערוץ (ראה איור 9.2). כאשר המרווח הספקטראלי גדול או שווה ל-2B, באופן עקרוני (יחד עם זאת ישנם פיתוחים חדשים בהם כלל זה לא מתקיים בדיוק, עושים Pulse Shaping). בנוסף לגודל זה מגדירים גודל נוסף של מכפלת קצב הביטים הכללי במרחק לפי (גודל זה מכונה קיבול הערוץ):

$$BL = (B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_N)L$$

באופן מעשי, היום קיימות מערכות WDM (point to point- backbone) מסחריות שמאפשרות ריבוב של 40 Gb/s עם 160 ערוצים למרחק שלמעלה מ-100 km (מרווח בין ערוצי של 50 GHz) - DWDM. תיאורטית ישנה אפשרות להגיע ל- $BL=30000 \text{ Tb/s-km}$ (באמצעות שימוש בסיבים יבשים- ללא הבליעה של הצורן OH הנמצא בסיבים), בערך פי 100 מהיכולת הקיימת כיום.

מערכות WDM שמושיות גם ברשתות LAN, MAN and WAN. קיום רשתות אלה הן אינן "שקופות" דהיינו ציוד הקצה שלהם הוא אלקטרוני ולכן הן סובלות מרוחב סרט מוגבל יחסית. כאשר משתמשים ב-WDM ברשתות אלה בדרך כלל אין צורך בריבוב כל כך צפוף ובקצבים כה גבוהים. ברשתות אלה WDM הוא בעל 16 ערוצים עם מרווח ספקטראלי של 2-10 nm וקצב שידור ערוצי של 2.5 Gb/s, לכן הוא מכונה CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexer, בשונה מה- DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing שמשמש ב- Backbone.



איור 9.2 מרווח בין ערוצים וקצב העברת מידע במערכת WDM

הפרמטר החשוב ביותר בתכנון של מערכת WDM הוא הזליגה הבין ערוצית (Crosstalk) שכן כאשר הספק של אפיק אחד חודר לאפיק שני הבצועים של המערכת יורדים. ישנם תופעות לא ליניאריות שגורמות לזליגה כזו להיות חמורה וישנם אף תופעות ליניאריות שגורמות לה. אנו נדון רק בתופעות הליניאריות. פרמטר חשוב נוסף הוא ההפסדים במערכת Insertion Loss, כאשר ההפסדים גדולים מדי לא יהיה ניתן להעביר תקשורת למרחק מספיק גדול ויעילות המערכת תרד.

ישנם שני סוגי Crosstalk עקרים – זליגה שנובעת מערוץ אחד לאחר בעקבות סינון לא אידיאלי של המסננים במקלט והיא מכונה Hetrowavelength Crosstalk (זליגה זו פחות בעייתית) או פשוט Out of Band Crosstalk וזליגה שנובעת מאותו ערוץ המכונה Homowavelength Crosstalk (והיא בעייתית) או פשוט In Band Crosstalk ומקורה באי אידיאליות שבהפרדת אורכי הגל במרבבים של WDM (לעיתים ערוץ אחד מסיב ספציפי זולג מעט לסיב שכן המכיל אותו ערוץ ואז הזליגה הרסנית). מאחר וזליגה כזו איננה עניינית לניסוי שאנו עושים לא נטפל בה. במקרה הראשון ניתן לרשום את הזרם שמתפתח בגלאי, הן באורך הגל הרצוי והן מערוצים אחרים לפי:

$$I = \overbrace{R_m P_m}^{ch} + \overbrace{\sum_{n \neq m}^N T_n R_n P_n}^{Leakage}$$

$$\delta_X = 10 \log \left(\frac{I_{Total}}{I_{ch}} \right) = 10 \log \left(\frac{R_m P_m + \sum_{n \neq m}^N T_n R_n P_n}{R_m P_m} \right) = 10 \log \left(1 + \frac{\sum_{n \neq m}^N T_n R_n P_n}{R_m P_m} \right)$$

if

$$R_n \approx R_m$$

$$P_n \approx P_m$$

$$\delta_X \approx 10 \log \left(1 + \sum_{n \neq m}^N T_n \right) = 10 \log(1 + X)$$

עצמת הזרם בגלאי תשתנה כל הזמן וכך גם הטור שמשקף את העצמה של האותות הלא רצויים שכן המופע של הפוטונים מערוצים שכנים הוא בעל אופטי סטטיסטי. התוצאה של הטור הזה היא למעשה רעש כיוון שהוא משתנה בצורה אקראית. כמובן שהשאיפה שלנו היא שהזליגה שלעיל תהיה קטנה ככל שאפשר (כלומר δ_X קרוב ככל שאפשר לאפס). באופן מעט שונה ניתן להגדיר את הזליגה הבין ערוצית כעצמת הקרינה של כל המקורות ביחס לעצמת הקרינה של הערוץ הנבחר:

$$\delta_X = 10 \log \left(\sum_{n \neq m}^N \frac{I_n}{I_m} \right) = 10 \log \left(\sum_{n \neq m}^N \frac{T_n R_n P_n}{T_m R_m P_m} \right) \approx 10 \log \left(\sum_{n \neq m}^N \frac{T_n P_n}{T_m P_m} \right)$$

if

$$T_m \approx 1$$

$$P_n \approx P_m$$

$$\delta_X \approx 10 \log \left(\sum_{n \neq m}^N T_n \right) = 10 \log(X)$$

לפי ההגדרה השנייה של הזליגה נשאף שהערך של δ_X יהיה כמה שיותר שלילי. ערכים טובים במערכות WDM הם -30 dB.

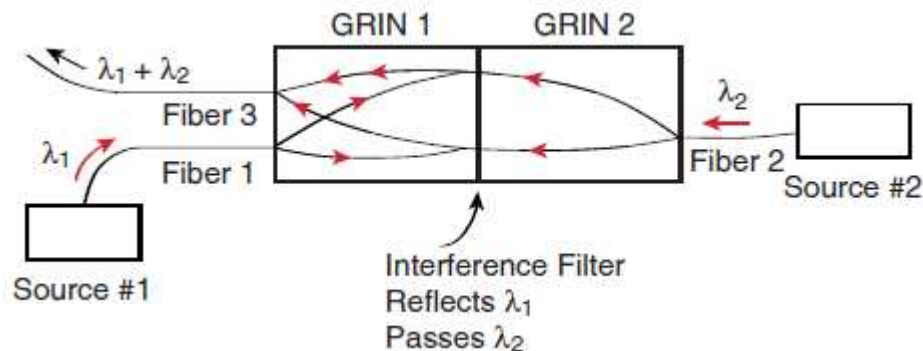
הפסדי הכניסה במערכת WDM מוגדרים באופן הבא. יהא P_i ההספק של כל מקור בכניסה למרבב, ויהיה P_T ההספק הכללי בסיב המוצא מהמרבב. הפסדי הכניסה של המערכת (Insertion Loss) מוגדרים לפי:

$$\delta_X = -10 \log \left(\frac{P_T}{\sum_i P_i} \right)$$

9.3 – קונפיגורציות פשוטות של מערכות WDM

מערכת WDM פשוטה מכילה שתיים או יותר כניסות של סיבים אופטיים, כאשר בכל סיב אורך גל אחר נושא את האותות. במוצא של המערכת ישנו סיב שעליו מרובבים הערוצים האופטיים מסיבי הכניסה בעזרת רכיב אופטי כגון סריג או מפצל כלשהו. שני סוגים עקרים של מערכות WDM קיימות, מערכות שמתבססות על דיספרסיה זוויתית ומערכות שמתבססות על סינון סלקטיבי. במערכות שמבוססות על דיספרסיה זוויתית

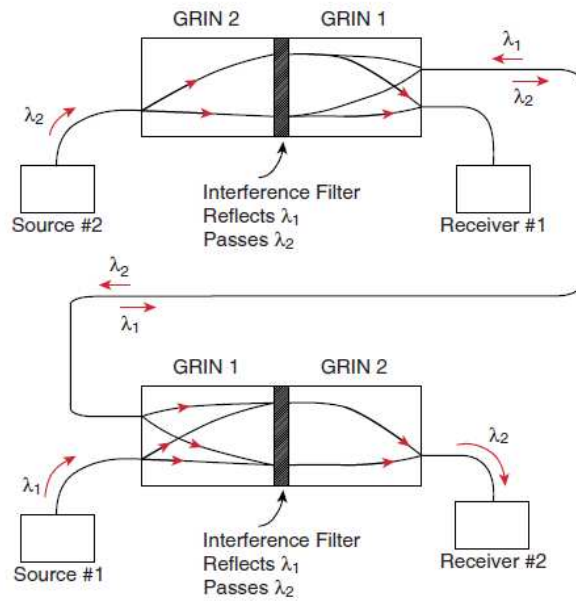
משתמשים בסריגים או בפריזמות כדי להפריד ולרַבב את האפיקים האופטיים. במערכות שמתבססות על סינון סלקטיבי בד"כ משתמשים במסננים דיאלקטריים (dielectric interference filters), או Fabre Filters, או Perrot ו-Tuned Semiconductors Filters. מערכת WDM פשוטה הכוללת שני ערוצים, שתי עדשות GRIN של 0.25 pitch ומסנן סלקטיבי מתוארת באיור 9.3.



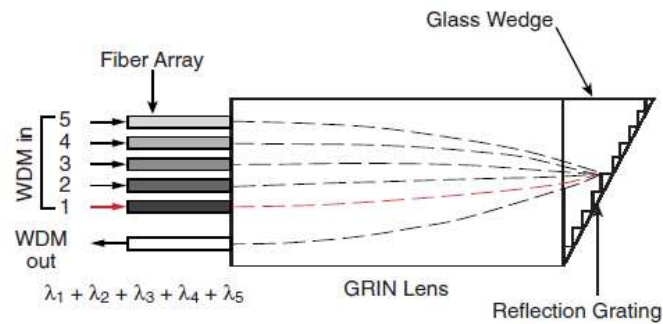
איור 9.3 – רבוב של שני ערוצים בעזרת עדשות GRIN ומסנן סלקטיבי

אור היוצא מהמשדר של λ_1 מצומד לסיב אופטי Fiber 1 אשר מוצמד לעדשה GRIN 1. עדשה זו מכילה מסנן סלקטיבי שמחזיר (Reflect) את λ_1 (אבל מעביר באופן חופשי את λ_2) אחורנית אל סיב אופטי Fiber 3 אשר מוצמד גם הוא לעדשה. שני הסיבים מוזזים באופן סימטרי ביחס לציר העדשה. אור היוצא מהמשדר של λ_2 מצומד לסיב אופטי Fiber 2 אשר מוצמד לעדשה GRIN 2 שאיננה מכילה מסנן. לכן, λ_2 עובר באופן חופשי לעדשה GRIN 1. הסיב Fiber 2 מוזז באופן סימטרי לציר העדשה ביחס לסיב Fiber 3, ולכן הפוטונים של λ_2 מתרכזים גם הם לסיב Fiber 3. באופן זה מרבבים (למעשה בנינו כאן את ה-Multiplexer) שני ערוצים אופטיים על פני סיב אחד. בקצה הסיב שמכיל את שני הערוצים בונים את אותו ההתקן שריבב את הערוצים אבל באופן הפוך וע"י כך מפרידים את אורכי הגל (למעשה התקן זה מהווה את ה-Demultiplexer), לאחר הפרדת הערוצים האופטיים מצמידים כל ערוץ לגלאי. באופן דומה ניתן לבנות מערכת תקשורת דו כיוונית, כלומר כזו שמעבירה תקשורת לשני הכיוונים על פני אותו סיב. איור 9.4 מתאר מערכת דו כיוונית בעלת שני ערוצים אופטיים (Two Way Communication Link).

דוגמא למערכת WDM, השייכת לסוג של מערכות WDM עם דיספרסיה זוויתית, מתוארת באיור 9.5. המערכת כוללת סיב כניסה אחד שמכיל 5 ערוצים אופטיים. האותות נכנסים לתוך עדשת GRIN של 0.25 pitch וממוקדים אל איבר סריג שמפצל את האלומה כך שכל אורך גל מתפזר עם זווית מעט שונה, באופן זה חמשת הערוצים מופרדים. ריבוב הערוצים במערכת כזו נעשה באופן דומה, אלא שכאן 5 הערוצים שפוגעים בסריג מתמקדים אל איבר סיב אחד.

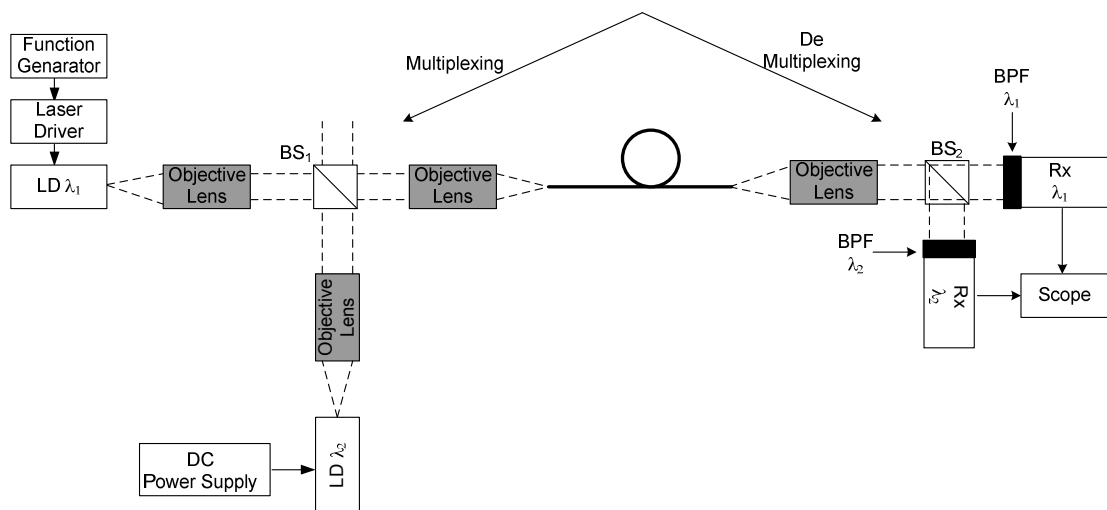


איור 9.4 – מערכת תקשורת דו כיוונית



איור 9.5 – מערכת WDM בעלת 5 ערוצים

מערכת WDM נוספת, פשוטה למדי, ניתן לכוון באמצעות שני מפצלי אלומה (BS), סיב אופטי אחד, מספר עדשות מיקרוסקופ (Microscope Objective Lens) ושני מסננים סלקטיביים. (ראה איור 9.6).



איור 9.6 – מערכת WDM דו ערוצית (תקשורת אנלוגית)

המערכת באיור 9.6 כוללת מכולל מידע (Function Generator) וספק כוח, דרייבר למשדר המאופנן מהשניים $LD \lambda_1$ המקבל את האות דרך כניסה אנלוגית. בנוסף לכך, המרבב מכיל מפצל אלומה (Beam Splitter) ושלוש עדשות מיקרוסקופ מרכזות. שני הערוצים מולבשים על סיב אופטי MMF ומופרדים במרבב השני (Demultiplexer) בעזרת עדשת מיקרוסקופ שנייה שיוצרת אלומה מקבילה במוצא (collimated beam) ומפצל אלומה שני (BS) שמחלק את האלומה לשניים. שני מסננים סלקטיביים BPF 1 ו-BPF 2 ושני גלאים D_1 ו- D_2 (שמוכלים בתוך המקלטים Rx ואינם מופעים באיור) מתרגמים את המידע האופטי לאות חשמלי. באופן הזה מרובבים (Multiplexing) שני ערוצי תקשורת המעבירים את המידע ומפרידים אותם (Demultiplexing) במוצא. חשוב לציין שמרבבים מהסוג שלעיל אינם יעילים מבחינה אנרגטית והם משומשים כאן רק כדי לפשט את הניסוי.

9.5 – מהלך הניסוי

הוצא את רשימת הציוד הבאה:

- 505B; Laser Diode Driver 1
- Coaxial Cables 2
- FL-ILD; Laser Diode Assembly
- FK-18281-30B; Laser Diode
- LD 808 nm
- LD 808 Mount & cable
- BS; Beam Splitter x2
- M-20X; 20X Objective Lens
- M-40X; 40X Objective Lens
- F-CL1; Fiber Cleaver
- 1918-C; Power Meter
- 918D-SL-OD3; Low Power Detector, Silicon x2
- FP3-FH1; Bare Fiber Holder x 2
- 818-FA2; Bare Fiber Holder Mount x 2
- F-916; Fiber Coupler Without Lens
- F-STR-175; Fiber Stripper
- SK-25A; Screw Kit, 1/4-20
- VPH-2; Post Holder, 2" x 10
- SPV-2; Post, 2" x 10
- VPH-3; Post Holder, 3" x 2
- SPV-3; Post, 3" x 2
- FP-1A; Fiber Positioner

- 423; Translation Stage x 6
- 360-90; Right Angle Bracket x2
- FK-STRAP; Grounding Wrist strap
- F-MLD 50; 100/140 MM Fiber, 50 m
- small BS alignment stage x 2 (included with the BS)
- Fiber Chuck; FPH-S x 2
- DC power supply
- Objective lens aligner (KM100R) x 2
- Objective lens NA 0.25 Mx10 x 2
- MH 2PM
- 58060- Thorlabs LD mount
- LD cable and adaptor
- Oscilloscope
- Function generator

The 808 nm LD operating conditions are:

$$I_{th} = 74mA$$

$$I_{opt} = 259mA$$

$$V_{opt} = 1.9V$$

הקפד על כללי הבטיחות, כאשר הלייזרים לא עובדים (לצורך כיוון או להעברת תקשורת) יש להקפיד לכבות אותם.

1. הכן את הדרייבר 505B לדיודת הלייזר באורך גל 785 ננומטר ואת ספק הכוח DC לדיודה השנייה.
2. הרכב שולחן XYZ באמצעות שלוש הבמות 423, מומלץ להתקין בקצה השמאלי של שולחן העבודה.
3. התקן הרכיב VPH2 ו- SPV2 על השולחן XYZ.
4. התקן את כבל ה-LD ל- SPV2. כוון את מגבל הזרם בדרייבר לזרם המתאים לדיודה. הקפד לכבותו לאחר פעולת הכווןון. **שים לב שאינך הורס את הדיודה!**
5. הרכב את ה- Objective lens aligner KM100R בתוך פוסט VPH2, התקן עדשת אובייקטיב בתוכו ומקם לפני ה-LD. העדשה מכילה את הרישום Mx10/0.25 NA.
6. התקן 916T על במה 423 כדי להגביה לגובה של ה- Beam splitter- BS.
7. בעזרת סרגל, תאם בין העצמית (Objective lens) שעל ה- 916 עם גובהה של העצמית שנמצאת ממול ל- LD.
8. כוון ה-LD למוקד העצמית (בערך 8 מ"מ מהמפתח הקדמי של העצמית) בעזרת הבמה XYZ (השתמש בכרטיס ה- IR) על מנת לבחון שכתם האור איננו גדל עם ההזזה של הכרטיס בשדה הרחוק- Collimated beam.

9. וודא כי האלומה שיוצאת מהאובייקטיב מכוונת ע"י קוו ברגים אחד של שולחן העבודה.
10. מקם את ה- BS במרחק של שלושה ברגים מהעצמית. שים לב לסימון הכיוונים שעל ה- BS. ההתקן אינו סימטרי לכן צפוי לקבל חלק יותר משמעותי מהאלומה בכיוון הרצוי שמסומן ע"י החץ.
11. כוון האלומה היוצאת מה- LD בדיוק אל מרכז ה- BS.
12. בשלבים הבאים נכוון את הערוץ השני של המשדר. הצב את העצמית השניה Mx10/0.25 באותו מרחק מה- BS בצורה דומה להכנת המשדר הראשון. גם הפעם תשתמשו בבמות XYZ (השתיים שנשארו) ומתקן הזווית הישרה.
13. הכן את מערכת השידור השנייה בעזרת שתי במות 423 שנשארו עם מתקן הזווית הישרה, SPV2, ו- VPH2. התקן לתוך ה- VPH2 את מתקן הדיודה עם העמוד שלו, כוון כך שהחור המיועד לדיודה יהיה בדיוק מול העצמית השנייה.
14. כוון את ספק הכוח הישר למתח והגבל את זרם המוצא לזרם הרצוי בדיודה השנייה. לאחר מכן, חבר אליו הדיודה וודא שישנו אור הבוקע החוצה מהדיודה.
15. רשום את הספק המוצא המתקבל מכל אחת משתי הדיודות ישירות באמצעות הגלאי. לצורך כך יש למקם את הגלאי כמה שיותר קרוב לדיודות ולרשום את התוצאות. **בהמשך תשתמש בתוצאות האלו לכן הקפד לבצע רישום מדויק.**
16. פעולת הכוונון היא קשה, שכן צריך לכוון את שתי האלומות שיתלכדו ביחד. זה נעשה ע"י כוונון אחת מהן שתהיה מקבילה לשולחן מבחינת גובה ומבחינת קו ישר, השתמש בנייר ה- IR לצורך פעולת הכוונון. לאחר מכן כוון את האלומה השנייה כך שתתפול באותו מקום. לצורך כך תצטרך לבצע את בדיקת ההתלכדות במרחק יחסית גדול מה- BS ובמהלך הכוונון תצטרך אולי לשחק עם כל המערכת שבנית עד כה. התייעץ במדריך!
17. לאחר קבלת אלומה מסודרת ומכוונת היטב, מציבים את ה- F91TS עם העצמית שלה ממש לפני הקרן המשותפת שמתקבלת. אפשר להגיע להספקים (7 mW, 3 mW) משתי הדיודות, בהתאמה.
18. לצורך המדידה, הכן קטע סיב באורך 2 מטר, קלף וחתוך היטב (הקפד על ריסוס קצה הסיב לפני החיתוך עם חומר הניקוי המצורף) משני הצדדים. צד אחד של הסיב יש להכניס לתוך ה- 916T והצד השני ע"י קונפיגורציה מתאימה לתוך הגלאי. צמד את האור לתוך צד זה ע"י כוונון הבמה 916T מבלי להפריד את שתי האלומות כפי שנעשה מקודם.
19. רשום את ההספקים שמתקבלים מכל אחד מהמקורות לחוד. זהו צעד חשוב ויכול להצביע על טיב פעולות הכוונון שנעשו.
20. לאחר מכן, הוצא את הסיב שהיה בגלאי, מקם בתוך FPHS והכניס לתוך FPR-1A. השתמש ב- Post holder כדי להציב את המערך על השולחן האופטי.
21. לפני הסיב שהצבת בסעיף הקודם, הברג Post holder שני ולתוכו הכנס את העצמית MX40 הפעם פעולת העצמית היא לילכוד את האור היוצא מהסיב וליצור אלומה מקבילה. דאג שהעצמית תוצב בצורה אופטימאלית ממול מפתח הסיב.
22. לאחר הצמית, במרחק של שני ברגים, הברג עוד Post holder ומקם את ה- BS השני. הקפד על יישור החלקים אחד מול השני.

23. בשני הענפים שמתקבלים במוצא ה-BS הצב את שני הגלאים כאשר על כל אחד מהם מודבק מסנן מתאים (חלק דמוי המראה של המסנן פונה החוצה). לצורך כך השתמש בדבק דו צדדי.
24. ניתן בשלב זה למדוד את ההספק שמתקבל בכל אחד מהגלאים. רשום ההספק שמתקבל בכל אחד מהגלאים מהערוץ שלו.
25. כבה ערוץ אחד ומדוד בגלאי שלו את ההספק שמגיע מהערוץ השני. חזור על פעולה זו לערוץ השני ורשום את התוצאות.
26. ע"י שני ההספקים שנמדדו מהדיודות בהתחלה והמדיודות האחרונות ניתן למדוד את סך ההפסדים במערכת Insertion loss.
27. שים לב כי המסנן הוא 780 ננומטר והמקור הוא 785 ננומטר לכן זה מוריד בערך מחצית מההספק של המקור רק במסנן. עבור המקור החלש 780 ננומטר מודדים כ-0.5 מיליוואט.
28. **אפנון:** כוון את מכולל האותות למתח ריבועי 1 וולט שיא לשיא בתדר 1 קילוהרץ. לפני חיבור האות המאפנן למקור, ניתן לחבר כבל BNC לסקופ ולמדוד צורת המתח שמגיע ממד ההספק ללא אפנון.
29. לפני חיבור כניסת האפנון לדרייבר יש לדאוג לשינוי ערך ה-DC המסופק מהדרייבר לדיודה. בהתחלה ערך זה היה 60 מיליאמפר. עכשיו צריך להוריד אותו ל-40-45 מיליאמפר כי עבור כל 1 וולט בכניסת האפנון הדרייבר מוסיף 20 מיליאמפר לזרם הדרייבר המסופק לדיודה. מהם הזרמים הקיצוניים שיספקו לדיודה לפי ערך ה-DC החדש וכניסת המתח שלקחת?
30. לאחר שמוודאים את נתוני המתח הריבועי על הסקופ ניתן לחבר לדרייבר של LD 785 ננומטר ולצפות ע"י הסקופ במתח שמתקבל בגלאי לאחר הגילוי.
31. יש לשנות את צורת המתח המסופק לדרייבר וכן את התדר ולראות כי האות שמתקבל לאחר הגילוי משתנה בהתאם. בדוק שהמידע אכן משודר ונקלט.

9.6 – שאלות הכנה

1. ברשותך סיב אופטי חד אופן עם חלון ספקטראלי ברוחב של 1THz סביב אורך גל של 1.55 מיקרומטר. כמה ערוצי תקשורת ניתן לרבב על פני הסיב (ללא pulse shaping) אם ידוע שקצב העברת המידע בכל ערוץ הוא 50 Gb/s? מהו המרווח הספקטראלי הדרוש בין כל ערוץ לערוץ? הנח שצורות האותות היא מלבנית והאפנון הוא NRZ.
2. ללא pulse shaping, מהי היעילות הספקטראלית המרבית שניתן לקבל ב-WDM? הנח שצורות האותות היא מלבנית והאפנון הוא NRZ.
3. האם נכונה האמירה שככל שהיעילות הספקטראלית גבוהה יותר כך מספר הערוצים שניתן לרבב גבוה יותר? נמק.
4. ציין במה שונה מערכת CWDM ממערכת DWDM (ציין לפחות שני דברים). באיזה מערכת קצב העברת המידע האפיקי מוגבל יותר? הסבר.
5. מהם שני הפרמטרים החשובים ביותר במערכת WDM?

6. נתון מערכת WDM דו ערוצית המבוססת על סינון סלקטיבי. המערכת כוללת שני משדרים מסוג LD, 780 ו-808 ננומטר, עם הספק מוצא זהה. עבירות כל אחד מהמסננים הסלקטיביים לאורך הגל השכן הינה 0.1% . חשב, בשתי הצורות המקובלות, את הזליגה הבין ערוצית (Crosstalk).
7. נתון מערכת WDM דו ערוצית המבוססת על סינון סלקטיבי. המערכת כוללת שני משדרים מסוג LD, 780 ו-808 ננומטר, עם הספק כניסה זהה. ידוע שההספק של ערוץ אחד במוצא מהמרבב (כלומר בכניסה לסיב שיוצא מהמרבב) קטן ב-20% מההספק הכניסה למרבב וכמו כן ידוע שההספק של הערוץ השני במוצא מהמרבב קטן פי שניים מההספק שלו בכניסה למרבב. הנח שאין קורולציה בין שני הערוצים (כלומר ניתן לסכום את ההספקים שלהם), מהם הפסדי ההספק של המרבב – Insertion Loss?