

מכון וייצמן למדע, תוכנית רוטשילד וייצמן

רואים את הקולות

תקשורת אופטית

עבודת גמר

מגישות :

רחל אנקו וכנה אופיר

מוגשת ל :

פרופ' ירון זילברברג פרופ' בת שבע אלון

תאריך : חשוון תשע"ד

אוקטובר 2013

תוכן העניינים

4.....	(א) מבוא
6.....	(ב) רקע היסטורי
10.....	(ג) סיבים אופטיים
10.....	(I) עקרונות הפעולה של סיב אופטי
10.....	(1) התפשטות האור מבוססת על אופטיקה גיאומטרית
13.....	(2) התפשטות האור מבוססת על תורת הגלים - משוואות מקסוול
15.....	(3) טרנספורם פוריה, יחס נפיצה ורוחב סרט
18.....	(II) מאפייני הסיב
18.....	(1) ניחות בסיב
19.....	(2) נפיצה
21.....	(3) סוגי סיבים
23.....	(ד) עקרונות תקשורת
23.....	(I) אות אנלוגי ודיגיטלי
23.....	(1) אות אנלוגי
24.....	(2) אות דיגיטלי
25.....	(II) אפנון וריבוב
26.....	(1) אפנון אות אנלוגי
27.....	(2) אפנון אות דיגיטלי
28.....	(3) ריבוב
29.....	(III) היבטים מערכתיים על תקשורת סיב-אופטית
29.....	(1) הפסדים
30.....	(2) עיוותים
32.....	(3) מהדרים
33.....	(IV) נספח להעשרה - אופטיקה לא ליניארית - סוליטון
35.....	(ה) החלק המעשי
35.....	(I) שלב א- בניית המערכת ואפיון המעגל החשמלי
38.....	(II) שלב ב- הכנסת אור לסיב

40.....	יחידת הוראה	(ו)
40.....	מבוא	(I)
40.....	רקע למורה	(II)
40.....	סיבים אופטיים	(1)
43.....	עקרונות תקשורת	(2)
45.....	רעיונות לפעילויות עם תלמידים	(III)
47.....	פעילות מפורטת – פעילות מבוססת סימולציה על תקשורת דרך סיבים	(IV)
47.....	רקע ומטרות הפעילות	(1)
47.....	הערות דידקטיות	(2)
48.....	תיאור הפעילות	(3)
55.....	ביבליוגרפיה	(ז)

מבוא

בחירתנו בתקשורת אופטית כנושא עבודת הגמר שלנו נבעה ממספר סיבות. ראשית תחום הסיבים האופטיים בכלל והתקשורת באמצעות סיבים בפרט הוא תחום רב עניין, הנמצא כיום בחזית הפיתוח הטכנולוגי. למעשה רובה של התקשורת כיום נשענת על סיבים אופטיים והפיזיקה העומדת בבסיס הנושא היוותה עבורנו מקור לעניין ולהעמקה.

כמורות לפיזיקה בבתי ספר תיכוניים רצינו לעסוק בנושא הרלוונטי לחיי היום-יום של התלמידים, קשור לתוכנית הלימודים ואף מהווה הרחבה והעמקה לחומר הנלמד. בבחירתנו בתקשורת אופטית התקבל מענה לשני היבטים אלה. כל תלמיד הלומד פיזיקה נפגש במסגרת לימודיו במעבר אור בין תווכים שונים, בחוק סנל והחזרה פנימית מלאה. השימוש בסיבים אופטיים מוזכר כיישום של החזרה פנימית מלאה אך לא מורחב אודותיו מעבר לכך. ראינו לנכון להעמיק בנושא זה המקשר בין החומר הלימודי למתרחש בחזית המדע והפיתוח כיום. תקשורת בעזרת סיבים אופטיים, מביאה לידי ביטוי תחומי ידע שונים: פיזיקה של סיבים אופטיים וטכנולוגיה של מערכות תקשורת. בעבודתנו ערכנו סקירה על כל תחום בנפרד, תוך שימת דגש על שילוב בניהם.

הפרק הראשון של העבודה עוסק ברקע היסטורי לתקשורת אופטית. מתוארת בו התפתחות תקשורת אופטית החל מהשאת משואות ועד לימינו, התפתחות האופטיקה הגיאומטרית והפיזיקלית, וההתפתחויות הטכנולוגיות שאפשרו שימוש בסיבים אופטיים לתקשורת. בפרק השני נסקור את הפיזיקה העומדת מאחורי סיבים אופטיים, הן בשימוש באופטיקה גיאומטרית והן בשימוש באופטיקה פיזיקלית (משוואות מקסוול). הרחבנו על מאפייני הסיב, ניחות ונפיצה בסיב.

בפרק השלישי הבאנו בקצרה את העקרונות עליהם מתבססת תקשורת בכלל ותקשורת אופטית בפרט. הרחבנו על סוגי אותות (אנלוגי ודיגיטלי), ועל אפנון וריבוב של אותות. כמו כן סקרנו היבטים שונים של מערכת תקשורת מבוססת סיבים, כמו הפסדים ועיוותים. בסיום הרקע התיאורטי הוספנו נספח להעשרה על סוליטונים, שהם צורות מיוחדות של גלים הנמצאות כיום בשימוש לתקשורת אופטית. הדיון בהם הובא בקצרה, היות והבנה עמוקה של הפיזיקה העומדת בבסיס תופעה זו חורגת מתחומי העבודה.

כהתנסות מעשית, בנינו מערכת פשוטה המדגימה תקשורת אופטית. בפרק הרביעי תיארו את בניית המערכת, מרכיביה והמאפיינים שלה ואת התנסותנו בהכנסת אור לסיב. יחידה זו הייתה משמעותית בעבורנו מאחר וכך ראינו הלכה למעשה את ההבדלים בין סוגי סיבים שונים (חד אופני לעומת רב אופני), את ההשפעות החזקות של ניחות ונפיצה בסיב וכן יישום של אפנון פשוט. הפרק האחרון עוסק בהוראת הנושא. הפרק כולל רקע תיאורטי למורה, רעיונות שונים לפעילויות עם תלמידים ופעילות אחת מפורטת. בפירוט מובא מהלך הפעילות, דפי עבודה והנחיות למורה כיצד לבצע.

כתיבת העבודה הייתה בעבורנו אתגר ששכרו בצידו, אנו מקווים שכל המעיין בה יצא גם הוא נשכר מקריאתה.

תודתנו נתונה לפרופ' ירון זילברברג שהנחה אותנו בחלק הפיזיקלי במסירות וסבלנות, לד"ר מיכה ניקסון שסייע לנו רבות בבניית המערכת והכניס אותנו לעולם המופלא של סיבים אופטיים ולד"ר אורי כץ שנתן לנו את הרעיון להתנסות המעשית והכיר לנו את עולם התקשורת.

תודה לפרופ' בת שבע אלון שהנחתה אותנו בכתיבת יחידת ההוראה ועזרה לנו להתמקד במקומות הנכונים, למיטל הנס ואורנית שגיא שסייעו לנו לפתח את הפעילות המפורטת, לאירינה ויסמן שעזרה לנו למצוא סימולציה מתאימה, ולד"ר חנה ברגר וד"ר אמנון חזן שייעצו וסייעו לנו לאורך כל הדרך.

תודה רבה לפרופ' שמעון לויט ולעומדים בראש תוכנית רוטשילד-ויצמן ולקרן רוטשילד, על התוכנית הנפלאה בה זכינו להשתתף שהעמיקה את הידע הפיזיקלי והפדגוגי שלנו וכן נתנה לנו כלים להוראה איכותית יותר.

תודתנו העמוקה למשפחותינו היקרות שללא תמיכתם לא היינו מגיעות לסיום העבודה.

קריאה מהנה

כנה ורחל

חשוון תשע"ד 10/2013

רקע היסטורי

בפרק זה נתייחס להתפתחות ההיסטורית של התקשורת באופן כללי, וכן להתפתחות האופטיקה הגיאומטרית והפיזיקלית כאשר הדגש יהיה על התפתחות התקשורת בעזרת סיבים אופטיים. המושגים המודגשים יוסברו בהמשך העבודה בפירוט. אמנם ההתפתחויות העיקריות בתעשיית הסיבים האופטיים ובתקשורת האופטית חלו בשלושים שנה האחרונות, אך הדרך אל ההבנה והפיתוח נפרסה על משך שנים רבות.

ב1621 וילבורד סנל (*Snell*) ניסח את **חוק סנל** העוסק בהתנהגות אור העובר בין תווך לתווך. הוא הראשון שתיאר בנוסחאות את מעבר האור בין תווכים ובעזרת החוק שלו ניתן לחשב את הזווית הקריטית למעבר אור מתווך צפוף לתווך דליל יותר. בתקופתו שלטה התיאוריה שטענה כי האור מורכב מחלקיקים, בעיקר בשל השפעתו של ניוטון שתמך בה.

ב1864 ג'יימס קלרק מקסוול (*Maxwell*) ניסח את **משוואות מקסוול** המתארות את תורת האלקטרומגנטיות והוא הסיק כי האור עונה למשוואות אלו ולכן האור הינו גל. היינריך הרץ, ב1888 הוכיח כי האור הוא גל בניסוייו בגלי רדיו. הרץ גם שם לב לראשונה לאפקט הפוטואלקטרי, שאותו הצליח להסביר אלברט איינשטיין רק ב1905. הסבריו היו מבוססים בין השאר על השערתו של פלנק מ1900.

מקס פלנק (*Planck*) פיתח את תאוריית קרינה במנות בדידות (שלימים ייקראו פוטונים), הסביר את תופעת קרינת גוף שחור ומצא את קבוע פלנק h . עם התפתחות תורת הקוונטים הוסבר כי הפוטון מקיים דואליות גל-חלקיק, כלומר לפוטון (ולמעשה לאור) יש בעת ובעונה אחת תכונות של גל ותכונות של חלקיק.

ב1930 ויליס לאמב (*Lamb*) ערך ניסויים באור שהונחה בסיב זכוכית וב1953 נארינדרה הסינג קאפאני (*Kapany*) פיתח סיבים בעלי מעטה, אך ההתקדמות המשמעותית הגיעה רק בשנת 1966, ועל כך נרחיב בהמשך.

במקביל להתפתחות האופטיקה התפתחו גם דרכי התקשורת. השימוש באותות אופטיים להעברת מסרים היה נפוץ כבר בעולם הקדום, אם על ידי שימוש במראות, השאת משואות, סימני עשן וכדומה. אמצעי תקשורת אולי הקדום ביותר המבוסס על אור הוא ההליוגרף. מכשיר זה מבוסס על מראה שמחזירה את אור השמש. את המראה ניתן לכוון אל צופה מרוחק וניתן להסתיר או לגלות את המראה. כך ניתן ליצור אותות קצרים או ארוכים של אור השמש. גם ביום מעונן ניתן ליצור מקור אור מלאכותי ולהחזיר אותו לצופה. המכשיר מוזכר כבר בימי היוונים והשימוש בו המשיך עד למאה העשרים בצבאות כמו צבא בריטניה וצבא פקיסטן, אך שיטת תקשורת זו מוגבלת ואיטית יחסית.

מערכת אופטית משוכללת יותר פותחה על ידי קלוד שאפה (*chappe*) בצרפת ב1794. הוא המציא את הסמפור, שימוש במוטות בזוויות שונות על מנת להעביר מסרים שונים. הקו הראשון קישר בין פריז ולייל, מרחק של כ200 ק"מ. ב1830 רשת התקשורת התפשטה באירופה. תפקיד האור היה להפוך את האותות לנראים, כדי שהממוען יוכל לקלוט אותם. התקשורת האופטית במאה ה19 הייתה איטית מאוד (יחסית להיום), במונחים של היום אפשר לומר שקצב הביטים היה פחות מביט אחד לשנייה.

הופעת הטלגרף החליפה את השימוש באור בשימוש בחשמל, ופתחה את תקופת התקשורת החשמלית. קצב הביטים B עלה בערך $10b/s$ על ידי שימוש בקודים כמו קוד מורס. כמו כן המרחק גדל- 1000 ק"מ. הקו הטורנס-אטלנטי הראשון נכנס לפעולה ב-1866. הטלגרפיה השתמשה בעיקר בשני פולסים חשמליים, נקודה וקו (פולס ארוך וקצר), מה שהיווה את הבסיס לתקשורת **דיגיטלית** (אות בדיד, ונרחיב על כך בהמשך).

המצאת הטלפון ב-1876 ולאחריו הפוטופון ב-1880 על ידי גרהם בל הביאו את השינוי המשמעותי מאות דיגיטלי לאות אנלוגי. התקשורת בדרך זו פועלת על אותם עקרונות של הרמקול של ימנו. תנודות הקול של המדבר מרעיד מראה והופך אותה מקעורה לקמורה ובכך משנה את האור החוזר מהמראה להיות מרוכז או מפוזר. התנגדותו של המקלט משתנה לפי עוצמת האור הפוגע בו, וכך ניתן להבחין בין אור מרוכז למפוזר ולמעשה לזהות את הקול המשודר. מאז, למשך כמאה שנה **האות** החשמלי **האנלוגי** היה דרך התקשורת הדומיננטית.

ההתפתחות של רשת טלפונים ברחבי העולם במהלך המאה העשרים הובילה להתקדמות בעיצוב מערכות תקשורת חשמליות. שימוש בכבל קוקסיאלי במקום זוגות תילים העלה את היעילות והקיבול של המערכת בצורה משמעותית. המערכת הראשונה המבוססת על קבל קוקסיאלי הוכנסה לשימוש ב-1940. רוחב הפס של מערכות כאלו מוגבל בגלל ההפסדים בכבל, מה שגרם לעליה מהירה של התדירות למעל $10MHz$. ההגבלה הזו הובילה לפיתוח מערכות תקשורת המבוססות על גלי מיקרו.

מערכת התקשורת המבוססת גלי מיקרו הוכנסה לשימוש ב-1948. מאז שימשו שתי המערכות הללו, כאשר לשתייהן קצב הביטים הוא גבוה יותר, כ $100Mb/s$. החיסרון הגדול של מערכת מבוססת כבל קוקסיאלי הוא הצורך שלה ב**מהדרים** (*repeater*) קרובים, בגלל ההפסדים המרובים, מה שהופך את המערכת ליקרה לתפעול. גם מערכות מבוססות גלי מיקרו למרות שמרחק המהדרים הוא גדול יותר, עדיין רוחב הפס מוגבל.

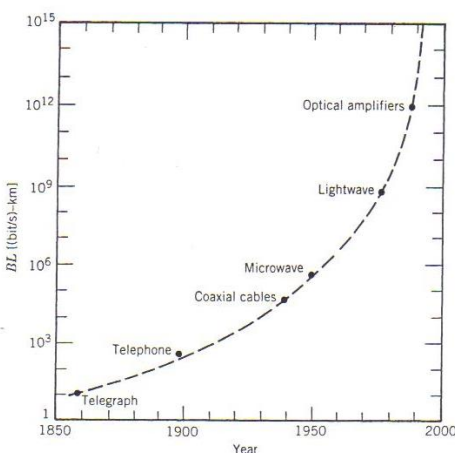
אפשר לדבר על המדד **קצב הביטים-מרחק** (*bit rate-distance product*), BL , כאשר B הוא קצב

הביטים ו L הוא המרווח בין המהדרים. באיור הבא ניתן לראות את עליית מדד ה BL במשך המאות האחרונות, בהתאם להתפתחות הטכנולוגיה.

במחצית השנייה של המאה העשרים היה ברור שניתן להעלות את מדד ה BL אם הגל הנושא את המידע יהיה אור נראה. אבל, לא היו מוכרים לא מקור אור נראה קוהרנטי ולא תווך שניתן להעביר בו אור נראה במהלך שנות החמישים. ב-1960 תאודור מיימן (*Maiman*) הציג את הלייזר הראשון. המצאת הלייזר פתרה את הבעיה של מקור האור הקוהרנטי, ותשומת הלב הוקדשה למציאת דרך להשתמש בלייזר כמקור האור לתקשורת אופטית.

ב-1966 צ'ארלס קאו (*Kao*) וצ'ארלס הוקמן (*Hockman*) העלו

הצעה לשדר את הלייזר דרך **סיבים אופטיים**. הניסיונות הראשונים לשדר אור למרחקים ארוכים (סדר גודל של קילומטרים) דרך סיבי זכוכית נערכו בשנה זו, אך זיהומי הזכוכית גרמו לניחות והפסדים גדולים בסיב, לכן התקשורת עדיין הוגבלה למרחקים קצרים. בנוסף על כך התווסף הקושי להכניס אור לתוך סיב בהינתן סוג הלייזר שהיה באותה התקופה.



איור 1: עליית מדד ה BL במשך המאות האחרונות, בהתאם להתפתחות הטכנולוגיה

ב 1970 – רוברט מורר (*Maurer*) וקבוצת חוקרים הצליחו לייצר סיבים בעלי הפסדים של פחות מ $20\text{dB}/\text{km}$ באורך גל של $\lambda = 0.85\mu\text{m}$. בערך באותו זמן (1962), ייצרו לייזרים הבנויים על מוליך למחצה, שפועלים בצורה רציפה גם בטמפרטורת החדר ומתאימים לאותו אורך גל (פחות או יותר). כך נסללה הדרך למערכות תקשורת מבוססות אופטיקה לטווח רחוק.

הדור הראשון של מערכות אופטיות התחיל סביב 1975, השידור היה באורך גל סביב $0.8\mu\text{m}$. קצב הביטים עלה ל 45Mb/s ומרחק השידור ל 10km . ב 1980 מערכות כאלו החלו להיות בשימוש מסחרי, כאשר חברת טלפון *AT&T* החלה בהנחת קווי תקשורת העשויים מסיבים אופטיים.

בשנות ה-70 היה ברור כי המרווח בין המהדרים יעלה אם ישתמשו באורך גל קרוב ל $1.3\mu\text{m}$. יותר מכך, סיבים אופטיים הפגינו מינימום נפיצה סביב אורך הגל הזה. התחיל מאמץ ברחבי העולם לפתח *InGaAsP* לייזרים הבנויים על מוליכים למחצה וגלאים שפועלים באורך הגל המתאים. כך התחיל הדור השני של תקשורת אופטית מבוססת סיבים בשנות ה-80 המוקדמות, אולם עדיין קצב הביטים היה מוגבל ל 100Mb/s בגלל הנפיצה בסיבים רב אופניים (*multimode fiber*).

על ההגבלה הזו התגברו בעזרת שימוש בסיבים חד אופניים (*single mode fiber*). ב 1981 הודגם בניסוי שידור של 2Gb/s לאורך 44km בסיב חד אופן. ב 1987 הדור השני של תקשורת אופטית דרך סיבים הפועל בקצב ביטים מעל 1.7Gb/s ובמרווחים בין המהדרים של 50km החל להיות זמין לשימוש מסחרי. עדיין בדור השני מרווחי המהדרים הוגבלו על ידי ההפסדים בסיבים באורך גל של $1.3\mu\text{m}$.

התברר כי ההפסדים של סיבי סיליקה (זכוכית) - SiO_2 מינימליים באורך גל של $1.55\mu\text{m}$. למרות זאת, המבוא לדור השלישי של תקשורת אופטית הפועלת באורך גל של $1.55\mu\text{m}$ התעכב במידה ניכרת בגלל הנפיצה הגדולה של סיבים סביב אורך גל זה. על קשיים אלו ניתן להתגבר בעזרת עיצוב סיבים מוסחי נפיצה (*dispersion shifted fibers*) או על ידי הגבלת הספקטרום של הלייזר לאופן אורכי אחד (*single longitudinal mode*). במהלך שנות ה-80 נבחנו שני הפתרונות, וב 1990 הדור השלישי של תקשורת אופטית, הפועל באורך גל של $1.55\mu\text{m}$ החל להיות זמין לשימוש. קצב הנתונים עלה ל 2.5Gb/s הודות לשילוב בין סוג הסיבים וסוג הלייזר. החיסרון של הדור השלישי היה בצורך לשחזר את האות אחרי מרחק של $60\text{--}70\text{km}$ על ידי מהדרים אלקטרוניים. היה ניתן להגדיל מעט את המרווח בין המהדרים על ידי שימוש במערכות קוהרנטיות בהן הקולטים רגישים יותר.

ב 1987 דיויד פיין (*Payne*) הצליח ליצור הגברה בסיב אופטי המאולח ביוני ארבוים באורך גל $1.55\mu\text{m}$. ארבוים הינו עופרה נדירה, ורמות האנרגיה של יוני הארבוים Er^{+3} מתאימות בדיוק לפליטה של אורך גל $1.55\mu\text{m}$, מה שמאפשר להשתמש בהם כמגברים. זהו הסוג הנפוץ ביותר של מגבר אופטי. היתרון של מגבר כזה על פני מגבר חשמלי הוא שאין צורך להפוך את האות לחשמלי, להגביר אותו ואז להפוך בחזרה לאופטי אלא יוני הארבוים קולטים את האות האופטי ופולטים אותו באורך הגל המתאים בדיוק. יישום תגלית זאת אפשרה להגדיל בסדר גודל את קצב הנתונים של מערכות תקשורת אופטית.

הדור הרביעי של תקשורת אופטית השתמש במהדרים אופטיים כדי להעלות את המרחק בין המהדרים ובריבוב בחלוקת אורך גל (*wavelength division multiplexing, WDM*) כדי להעלות את

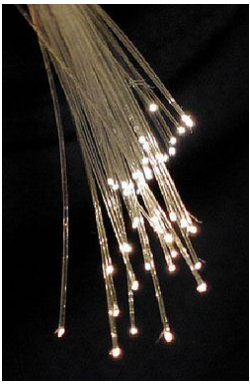
קצב הביטים. המרחקים האופייניים בין מגברי הארביום היו כ-80-60km. השימוש ב-WDM העלה כל כך מהר את קצב הנתונים, עד כדי כך שב-2001 קצב הביטים עמד על 10Tb/s. שימוש ב-WDM ובמהדרים אופטיים (מגברי ארביום), שאינם דורשים תחזוקה שוטפת כמו מגברים אלקטרוניים, איפשר להניח קו תקשורת מתחת לאוקיינוס ביתר קלות. קו כזה הונח ב-1996, לאורך 11300km ובקצב של 5Gb/s. הדרישה לקווים כאלו עלתה בין השאר בגלל השימוש שהלך וגבר ברשת האינטרנט, שדרש קצב נתונים גבוה ותקשורת חובקת עולם.

הדגש עבר להגדלת הקיבול של המערכות על ידי שידור של יותר ערוצי תקשורת בעזרת WDM. עם העלאת רוחב הפס של אות ה-WDM נעשה בלתי אפשרי לשחזר את כל ערוצי התקשורת בעזרת מגבר בודד. במהלך שנת 2000 נעשו ניסיונות להתגבר על קושי זה, ואכן לקראת סוף השנה התחיל להיות בשימוש מסחרי קו תקשורת עם קיבול של 1.6Tb/s לאורך אלפי ק"מ. מדד ה-BL עלה קרוב ל-10000(Tb/s)-km.

בדור החמישי עסקו בהרחבת תחום אורכי הגל בהם ניתן לשדר סימולטנית ב-WDM. התחום הרגיל עומד כיום על 1.53-1.57μm ונקרא רצועת C (C band). סוג חדש של סיבים פותח, בהם ההפסדים קטנים בתחום יחסית רחב של אורכי גל, 1.3-1.65μm. בדור החמישי נעשה גם ניסיון להגדיל את קצב הנתונים של כל ערוץ ב-WDM. מערכות כאלו, בהן משודרים במקביל מאות ערוצים, וכל ערוץ בקצב ביטים גבוה מאוד, מחייבות ניהול זהיר של הנפיצה. גישה מעניינת לניהול כזה מתבססת על סוליטונים אופטיים, פולסים ששומרים על צורתם לאורך מרחק גדול מאוד, כמעט ללא הפסדים, ומנטרלים את הנפיצה על ידי הסיב בדרך לא ליניארית.

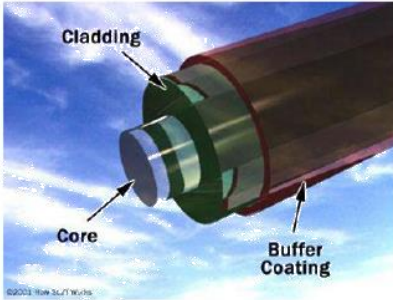
למרות שהרעיון הוצע כבר ב-1973, רק ב-1988 בוצע ניסוי ראשון מוצלח של תקשורת בעזרת סוליטונים. לין מולנהאור (Mollenhauer) ממעבדת בל העביר סוליטונים בסיב שאורכו 10,000 ק"מ, כמעט ללא הרחבה. יישום זה העלה בסדר גודל נוסף את רוחב הפס של מערכות תקשורת. ב-1996 התחילו להשתמש בסוליטונים ב-WDM, בשילוב עם ניהול הנפיצה. ב-2000, כבר העבירו 27 ערוצי WDM כל אחד בקצב של 20Gb/s, לאורך 9000km בשימוש בסוליטונים ובמגברי ארביום. אמנם התקשורת האופטית דרך סיבים נולדה לפני זמן לא רב, אך ההתפתחות שלה הייתה מהירה מאוד. במהלך חצי יובל, מ-1980 עד 2005 קצב הביטים עלה פי 100000 וגם מרחק השידור ללא מהדרים עלה מ-10 ל-10000km באותו הזמן. בשנת 2009 ניתן פרס נובל בפיסיקה בשני חלקים, מחצית הפרס ניתנה לפרופ' צ'ארלס קאו "על הישגים פורצי דרך בהעברת אור בסיבים אופטיים לתקשורת אופטית". המחצית השנייה חולקה בין ויליאמס בוייל וג'ורג' סמית עבור החדשנות בתחום ההדמיה על מעגלים של מוליכים למחצה, חיישני CCD. התקשורת האופטית לא מפסיקה להתפתח, וגם נכון לכתיבת שורות אלו נעשים ניסיונות להגדיל את קצב הנתונים ולשפר את איכות האות.

סיבים אופטיים



עקרונות הפעולה של סיב אופטי

סיב אופטי הינו סיב דק מחומר שקוף המאפשר להעביר דרכו אור מקצה אחד לקצהו השני. ניתן לייצר סיבים אופטיים מחומרים שונים, אם כי זכוכית היא החומר הנפוץ ביותר (שמשי, 2012).



איור 2: הסיב בנוי מליבה גלילית (core) ומעטפת (cladding) שתייהן שקופות ומקדם השבירה של הליבה גבוה במעט ממקדם השבירה של המעטפת. המעטפת מצופה בשכבה נוספת (jacket). מתוך: (Fiber Optic 101, 2010)

הסיב בנוי מליבה גלילית (core) ומעטפת (cladding) שתייהן שקופות ומקדם השבירה של הליבה גבוה במעט ממקדם השבירה של המעטפת. מצב זה יוצר אפשרות לקיום העיקרון הנקרא החזרה פנימית מלאה (total internal reflection), עליו נרחיב מיד. במקרה בו מתרחשת החזרה פנימית מלאה קרני האור "נלכדות" בסיב ומתקדמות בתוך הליבה מבלי "לברוח" החוצה. המעטפת מצופה בשכבה נוספת (jacket) שעשויה בדרך כלל מפלסטיק ונועדה להגן על הסיב משריטות וכדומה.

הצורה הפשוטה ביותר של סיב אופטי היא ליבה בעלת מקדם שבירה מסוים ומעטפת בעלת מקדם שבירה אחר. סיב כזב נקרא סיב מדרגה, מכיוון שמקדם השבירה משתנה בקפיצת מדרגה. בצורה אחרת של סיב מקדם השבירה של הליבה משתנה בהדרגה ועולה ככל שנכנסים למרכז הליבה. עוד על סוגי סיבים נפרט בהמשך.

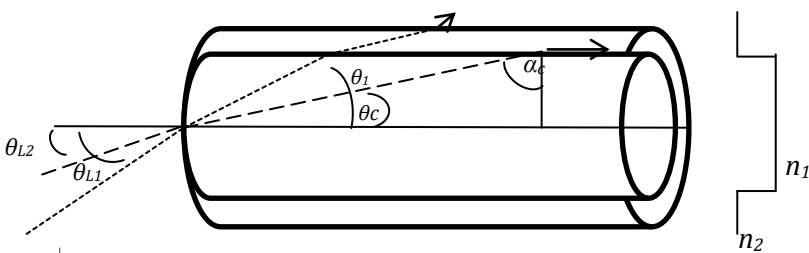
ניתן לתאר את התפשטות האור בסיב אופטי בעזרת תרשימי קרניים המבוססים על אופטיקה גיאומטרית. התיאור של אופטיקה גיאומטרית טוב כאשר רדיוס הליבה גדול הרבה יותר מאשר אורך הגל λ של האור העובר בו. כאשר אורך הגל ורדיוס הליבה הם באותו סדר גודל, הכרחי לתאר את האור כגל המתפשט לפי משוואות מקסוול (Agrawal, 2002).

התפשטות האור מבוססת על אופטיקה גיאומטרית

כאשר אור עובר מתווך בעל מקדם שבירה אחד לתווך בעל מקדם שבירה שונה כיוון האור משתנה לפי חוק סנל:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

באיור הבא מתואר סיב טיפוסי, דרכו עוברות שני קרניים בליבה בזוויות שונות. קרן ראשונה: בכניסה אל הסיב מתרחשת שבירה בין האוויר לליבה והקרן ממשיכה בזווית קטנה יותר, פוגעת בשכבה החיצונית, מתרחשת שבירה נוספת והקרן מגיעה למעטה הסיב החיצוני שם היא נשברת ויוצאת ממנו.



איור 3: סיב טיפוסי, דרכו עוברות שני קרניים בליבה בזוויות שונות. קרן אחת ממשיכה בסיב והשנייה נשברת ויוצאת ממנו.

קרן שנייה: מתרחשת שבירה בכניסה לסיב, ובהגיעה למעטה השכבה הפנימית הקרן נשברת בזווית של 90° ולמעשה לא יוצאת מהסיב. זווית הפגיעה במעטה נקראת הזווית הקריטית α_c , וקרן

הפוגעת במעטה בזווית גדולה מזווית זו תתקדם בתוך הסיב. ע"פ חוק סנל ניתן לחשב את הזווית

$$\alpha_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad \text{הקריטית:}$$

כיוון הקרן שמכתיב את הזווית הקריטית יוצר זווית θ_c עם הציר המרכזי של הסיב. קרניים הפוגעות בליבת הסיב בזוויות גדולות מ θ_c לא יתקדמו בו. זווית זו נקראת **זווית ההתפשטות**

$$\cos \theta_c = \sin \alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{הקריטית ומשקולים גיאומטריים:}$$

אופני התפשטות

כל הקרניים הפוגעות בזווית הקטנה מ θ_c יישארו בתוך הסיב, ובתחום $0 < \theta < \theta_c$ יש למעשה אינסוף קרניים כאלו, אך רק חלק מהן יתפשטו בסיב ויעבירו אנרגיה לאורכו. לקרניים אשר מתקדמות בזווית מסוימות ומאפשרות העברת אנרגיה קוראים אופני התקדמות או אופני התפשטות (*propagation mode*). את הזוויות המתאימות לאופני ההתפשטות, ונקראות זוויות התקדמות, ניתן לחשב על פי משוואות מקסוול כפי שנרחיב בהמשך.

המספר הכולל של אופני ההתפשטות גדל ככל ש θ_c גדלה. $\theta_c \propto \frac{n_2}{n_1}$, ולכן מספר האופנים הכולל

גדל ככל שגדל ההפרש היחסי בין מקדמי השבירה (*relative refractive index difference*)

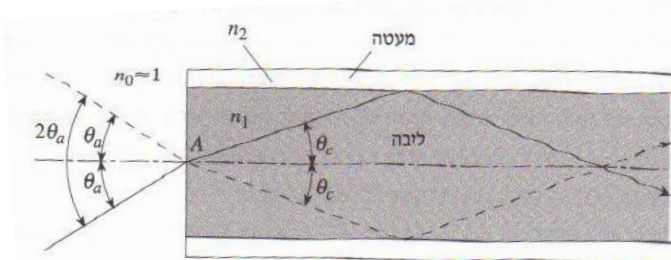
$$\frac{n_2 - n_1}{n_1}. \text{ ישנם אופנים מסדר גבוה, שבהם זוויות ההתקדמות קרובות לזווית הקריטית } \theta_c,$$

ואופנים מסדר נמוך שבהם זוויות ההתקדמות קטנות מאוד מהזווית הקריטית.

זווית קליטה ומפתח נומרי

"מפתח נומרי" הוא מדד ליכולת קליטת האור של הסיב. זווית ההתקדמות חייבת להיות קטנה או שווה לזווית הקריטית $\theta \leq \theta_c$. על מנת שתנאי זה ישמר תחום הזוויות של אלומת האור הנכנס

אל הסיב חייב להיות צר מספיק. נסמן את זווית הכניסה לסיב (*acceptance angle*), או בתלת מימד זווית הראש של חרוט הכניסה (*acceptance cone*) כ $2\theta_a$, כפי שניתן לראות באיור הבא:



איור 4: זווית כניסה לסיב הקובעת את המפתח הנומרי (האוניברסיטה הפתוחה).

על מנת למצוא את הקשר בין הזווית θ_a למקדמי השבירה של הסיב נשתמש בחוק סנל:

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_c} = \frac{n_1}{n_{air}} = n_1 \Leftrightarrow \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c$$

הגודל $\sin \theta_a$ נקרא מפתח נומרי (*numerical aperture N.A*) ומתקיים:

$$N.A = \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c$$

על ידי שימוש בזהות $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$ ובמקדמי השבירה של הליבה $n_1 = n_{core}$ ושל המעטה

$$, N.A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad n_2 = n_{clad}$$

כך שזווית הקליטה היא: $\theta_a = \sin^{-1} N.A = \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. את המפתח הנומרי ניתן לבטא גם

באמצעות ההפרש היחסי של מקדמי השבירה (*relative refractive index difference*):

$$. N.A = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{N.A^2}{2n_1^2}$$

לעיתים מבטאים את Δ כך: $\Delta = \frac{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)}{2n_1^2}$, וכאשר $n_1 \approx n_2$ מתקיים

$$. \Delta = \frac{2n_1(n_1 - n_2)}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

כאמור לעיל, Δ גדול (כלומר $N.A$ גדול) יוצר מספר גדול של אופנים, מה שמגביל מאוד את רוחב

הפס של הסיב בתקשורת, ונרחיב על כך בהמשך. מספר אופייני של Δ הוא מסדר גודל של 0.001-

0.03. (האוניברסיטה הפתוחה, 1997)

התפשטות האור מבוססת על תורת הגלים - משוואות מקסוול

כמו כל התופעות האלקטרומגנטיות, התפשטות אור בסיב מקיימת את משוואות מקסוול:

$$\begin{aligned} i. \quad \nabla \times \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ ii. \quad \nabla \times \vec{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{J}_{ex} \\ iii. \quad \nabla \cdot \vec{D} &= 4\pi \rho_{free} \\ iv. \quad \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}$$

באינטראקציות שבשימוש האופטיקה, אין מטענים חופשיים ואין זרמים, התווך בו עובר האור הוא מבודד. כמו כן אנחנו מניחים כי מדובר על תווך ליניארי, כלומר μ ו ϵ הם קבועים ולא תנזורים, והם לא תלויים בזמן או במרחב. כך שבגזירה של המשוואות הם עוברים כקבועים. מכל הסיבות הללו משוואות מקסוול מסתכמות לצורה:

$$\begin{aligned} i. \quad \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\mu}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ ii. \quad \nabla \times \vec{H} &= \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ iii. \quad \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ iv. \quad \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \end{aligned}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \times \frac{-\mu}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad : i \text{ משוואה על משוואה}$$

$$: \nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad \text{נשתמש בזהות}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = \frac{-\mu}{c} \frac{\partial(\nabla \times \vec{H})}{\partial t} \quad \text{ונקבל}$$

$$\boxed{\nabla^2 \vec{E} = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}} \quad : ii \text{ ו } iii \text{ נציב את משוואות}$$

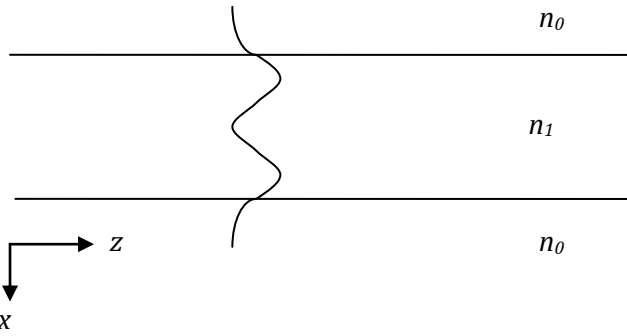
כך קיבלנו את משוואת הגלים!

משוואה זו מתארת גל שנע במהירות $\frac{c}{n}$, n הוא מקדם השבירה, כאשר: $n = \sqrt{\epsilon \mu}$.

הפתרון למשוואת הגלים הוא גל מישורי אינסופי: $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$

$$\omega^2 \frac{n^2}{c^2} = |\vec{k}|^2 \quad \text{כאשר נציב פתרון זה במשוואת הגלים נקבל}$$

זהו יחס הנפיצה בחומר מבודד, על יחס נפיצה באופן כללי ונגזרותיו נרחיב בהמשך.



איור 5: במקרה הדו מימדי אנו מסתכלים על גל המתקדם על מישור $x-z$ בכיוון z . בסיב אופטי המטרה היא ליצור מצב בו הגל מתקדם בציר z , בעוד בציר x יש פונקציה $f(x)$ שמתנדנדת בתוך החומר האמצעי n_1 (ליבת הסיב) ודועכת בצדדים, n_0 (מעטה הסיב).

$$E = f(x)e^{i(k_z z - \omega t)}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(k_z^2 - \omega^2 \frac{n^2}{c^2})$$

נקבל פתרון דועך.

סיב אופטי - מנחה גלים:

לשם פשטות, ננתח את המקרה הדו מימדי. כאשר במקרה התלת מימדי העקרונות זהים אך החישובים מעט יותר מסובכים. במקרה הדו מימדי אנו מסתכלים על גל המתקדם על מישור $x-z$ בכיוון z .

בסיב אופטי המטרה היא ליצור מצב בו הגל מתקדם בציר z , בעוד בציר x יש פונקציה $f(x)$ שמתנדנדת בתוך החומר האמצעי n_1 (ליבת הסיב) ודועכת בצדדים, n_0 (מעטה הסיב). לכן נחפש פתרון כזה:

כאשר נציב פתרון זה במשוואת הגלים נקבל:

$$\text{עבור } k_z^2 - \omega^2 \frac{n^2}{c^2} > 0, \text{ כלומר } k_z^2 > \omega^2 \frac{n_0^2}{c^2}$$

$$\text{עבור } k_z^2 < \omega^2 \frac{n_1^2}{c^2} \text{ נקבל פתרון מתנדנד.}$$

$$\text{למעשה יש כאן הגבלה על } k_z: \frac{\omega n_0}{c} < k_z < \frac{\omega n_1}{c}$$

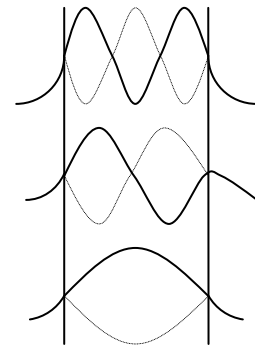
כדי שהפתרון אכן יתנדנד הוא צריך להיבנות קוהרנטית, כלומר הגל שיוחזר מהשפה מתלכד עם הגל הפוגע ויווצר למעשה גל עומד בכיוון x בתוך ליבת הסיב. אם עובי הסיב הוא d , אזי התנאי לכך הוא -עבור הפתרון הסינוס:

$$\sin(k_x d) = 0 \Rightarrow k_x d = m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

כלומר, לא כל אופני התנודה יוכלו ליצור גל עומד אלא רק אופנים המקיימים תנאי זה. עבור

הפתרון הקוסינוס- נקבל אותם פתרונות מוזזים ב $\frac{\pi}{2}$. נשים לב כי בתווך

דיאלקטרי ולא מתכתי הגל לא מתאפס על השפה אלא דועך, לכן תמיד יהיה לפחות אופן תנודה אחד אפשרי גם עבור סיבים דקים מאוד (פחות מחצי אורך גל). תופעה נוספת שמתרחשת כתוצאה מכך שעוצמת האור לא מתאפסת אלא דועכת במעטה היא מינהור, בדומה למינהור קוונטי. אם שני סיבים נמצאים סמוך מאוד אחד לשני ועוצמת האור העובר באחד לא דעכה לאפס במעטה שלו, האור יכול לעבור לסיב הסמוך אליו ולהתקדם בו.



אופן שלישי

אופן שני

אופן ראשון

איור 6: אופני תנודה

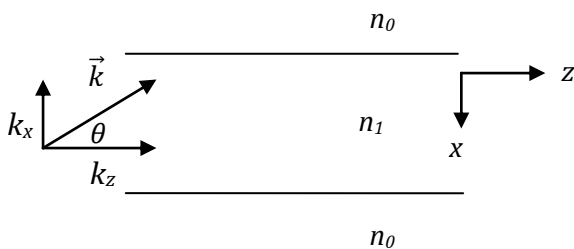
$$\text{tg } \theta = \frac{k_x}{k_z}$$

זוויות הכניסה האפשריות חייבות לקיים את הקשרים הבאים בין k_x ל k_z :

$$|\vec{k}|^2 = k^2 = k_x^2 + k_z^2$$

$$\text{ולכן: } \text{tg } \theta = \frac{k_x}{\sqrt{k^2 - k_x^2}} = \frac{m\pi/d}{\sqrt{k^2 - (m\pi/d)^2}}$$

אופן תנודה שיתקדם בזוויות המקיימות את התנאי הזה יוכל להמשיך להתקדם בסיב כמעט ללא הפסדים.



איור 7: זוויות הכניסה האפשריות חייבות לקיים קשרים מסויימים בין k_x ל k_z .

טרנספורם פוריה, יחס נפיצה ורוחב סרט

על פי פוריה (Fourier) כל אות, בין אנלוגי ובין דיגיטלי, ניתן לתאר כאוסף אינסופי של אותות

$$f(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\vec{k}, \omega) e^{2\pi(i\vec{k}\cdot\vec{r} + i\omega t)} d\omega d\vec{k} \quad \text{על פי } \sin \text{ או } \cos$$

כאשר משדרים אות, לא משדרים גל סינוס או קוסינוס מושלם, כי הוא אינו מכיל מידע. למעשה תמיד משדרים "חבילות גלים", כאשר גם פולס של אור הוא חבילה מאוד מרוכזת של גלים. כלומר האות המשודר הוא אוסף (סכום) של גלים סינוסיאליים מונוכרומטיים, לכל גל סינוס יש תדירות ω מסויימת המיוחדת לו ומשקל שונה לכל אחד. המקדם של כל גל $g(\vec{k}, \omega)$ היא פונקציית המשקל שמקבל כל גל שמרכיב את האות, כלומר התרומה שלו לחבילת הגלים.

בגלים מישוריים, בהם מתקיים: $\vec{\phi}(\vec{r}, t) = \vec{\phi}_0 e^{i\vec{k}\cdot\vec{r} - i\omega t}$, אפשר להגדיר את מהירות הפאזה φ , v_{ph} , כמהירות בה מישורים שווי פאזה מתקדמים, כאשר $\varphi = \vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t$. מישורים שווי פאזה הם מישורים בהם הפאזה φ קבועה, כלומר $\varphi = \vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t = const$. אם נגזור את המשוואה הזו בזמן נקבל: $\vec{k} \cdot \vec{v}_{ph} - \omega = 0$. בגלים מישוריים מהירות הפאזה תמיד מקבילה לוקטור הגל, ולכן: $kv_{ph} = \omega$ ומכאן $v_{ph} = \frac{\omega(k)}{k}$. למעשה מהירות הפאזה היא המהירות בה מתקדם כל גל מונוכרומטי.

המהירות בה מתקדמת המעטפת של חבילת הגלים, כלומר האות, נקראת מהירות החבורה ומוגדרת כ: $v_g = \frac{d\omega(k)}{dk}$.

המשוואה על הגל, שיכולה להיות משוואות מקסוול בריק (שהופכות למשוואת הגלים) או בחומר קובעת את התלות של ω ב k , ולמעשה את $\omega(k)$, שנקרא יחס הנפיצה. יחס זה מעיד על ההתקדמות של כל גל מונוכרומטי (v_{ph}) ושל כל חבילת הגלים (v_g). המקרה של יחס נפיצה

ליניארי, כמו במשוואת הגלים, הוא מקרה מיוחד. $\omega(k) = ck$.

$$v_{ph} = \frac{\omega(k)}{k} = c = \frac{d\omega(k)}{dk} = v_g \quad \text{ואז:}$$

בגלים כאלו המהירות של כל הגלים המונוכרומטים שווה והיא שווה גם למהירות החבורה. לכן חבילות גלים כאלו לא יתפרקו. במקרה בו יחס הנפיצה אינו ליניארי, המהירות של כל גל מונוכרומטי מעט שונה, והיא שונה גם ממהירות החבורה. אם כל תדירות (או כל אורך גל בהתאם) מתקדם מעט שונה, ה"חבילה" עלולה להתפרק והאות עלול לאבד את צורתו ולהתעוות.

הנגזרת השנייה, $\frac{d^2\omega(k)}{dk^2}$, קובעת כמה מהר החבילה תתפרק. בסיבי סיליקה הנגזרת השנייה מתאפסת ב $1.3\mu m$, מה שאומר מינימום נפיצה עבור אורך גל זה. זו הסיבה שבדור השני של תקשורת אופטית השתמשו באורך הגל הזה.

בשידור דיגיטלי, בו משדרים פולסים של אור, כל פולס (דופק) הוא חבילת גלים שמורכבת מהרבה תדירויות שונות. יחס הנפיצה ונגזרותיו יקבעו האם הפולס יתרחב וכמה מהר זה יקרה. רוחב הסרט של אות הוא תחום התדירויות המרכיבות את האות, והוא נקבע בצורה מתמטית לפי טרנספורם פוריה של האות.

רוחב פס

רוחב פס (*bandwidth*) הוא כמות הנתונים שניתן להעביר בקו תקשורת בזמן נתון. רוחב הפס נמדד בסיביות לשנייה (*bps - bits per second*) (ויקיפדיה, רוחב פס).

ניתן לדבר על רוחב הפס (*bandwidth*) BW של מקור האור ושל המערכת. מקורות הפולטים אור שאינם מונוכרומטי, כלומר מקורות הפולטים אור בתדירות שאינה אחידה אלא פס תדירותות מתאים לאורכי הגל, רוחב הפס $\Delta\lambda$ של מקור אור מוגדר כרוחב תחום אורכי הגל בין שתי נקודות, שבהן אנרגיית האור יורדת למחצית ההספק המירבי שלה. לרוחב הפס של המקור יש השפעה על ביצועי מערכות שידור סיב אופטיות, כאשר רוחב פס גדול מקטין את קצב העברת הנתונים המירבי במערכת.

רוחב פס של מערכת הוא תחום התדרים בהם המערכת יכולה לטפל מבלי לגרום להפסדים גדולים מידי בעוצמת האות. למעשה אפשר לאפיין את תחום התדרים על ידי התדירות הגבוהה ביותר האפשרית במערכת, כלומר תדירות בהן ההספק האופטי במוצא יורד ל 50% מערכו המקסימלי.

כמו כן ניתן גם לדבר על רוחב פס חשמלי ורוחב פס אופטי. רוחב פס אופטי הוא התדירות שבה יחס ההספקים יורד ל 0.5. רוחב פס חשמלי הוא התדירות שבה יחס ההספקים החשמליים יורד ל 0.707. שני ההספקים מתייחסים ליחס הזרמים, אך ההספק האופטי נמצא ביחס ישר לזרם ואילו ההספק החשמלי תלוי בריבוע הזרם.

המושגים רוחב פס ורוחב פס קשורים קשר הדוק, אך הם אינם זהים. רוחב הסרט הוא תחום התדירותות המרכיבות את האות, הוא נקבע מתמטית בלבד. רוחב הפס קשור למערכת והמאפיינים שלה וקובע את קצב השידור האפשרי בה. ניתן לשנות את רוחב הפס בשינוי מאפיינים של המערכת. מערכת אידיאלית צריכה להיות כזו שרוחב הפס שלה ושל מקור האור גדול יותר מרוחב הסרט של האות אותו רוצים להעביר דרכה (האוניברסיטה הפתוחה, 1997).

מהירות התקדמות של גלים בסיב

מקדם השבירה n של כל חומר בטבע משתנה כתלות באורך הגל, לכן מהירות האור בחומר מסוים

תלויה באורך הגל $v = \frac{c}{n}$. בדרך כלל מקדם השבירה יורד עם עליית אורך הגל.

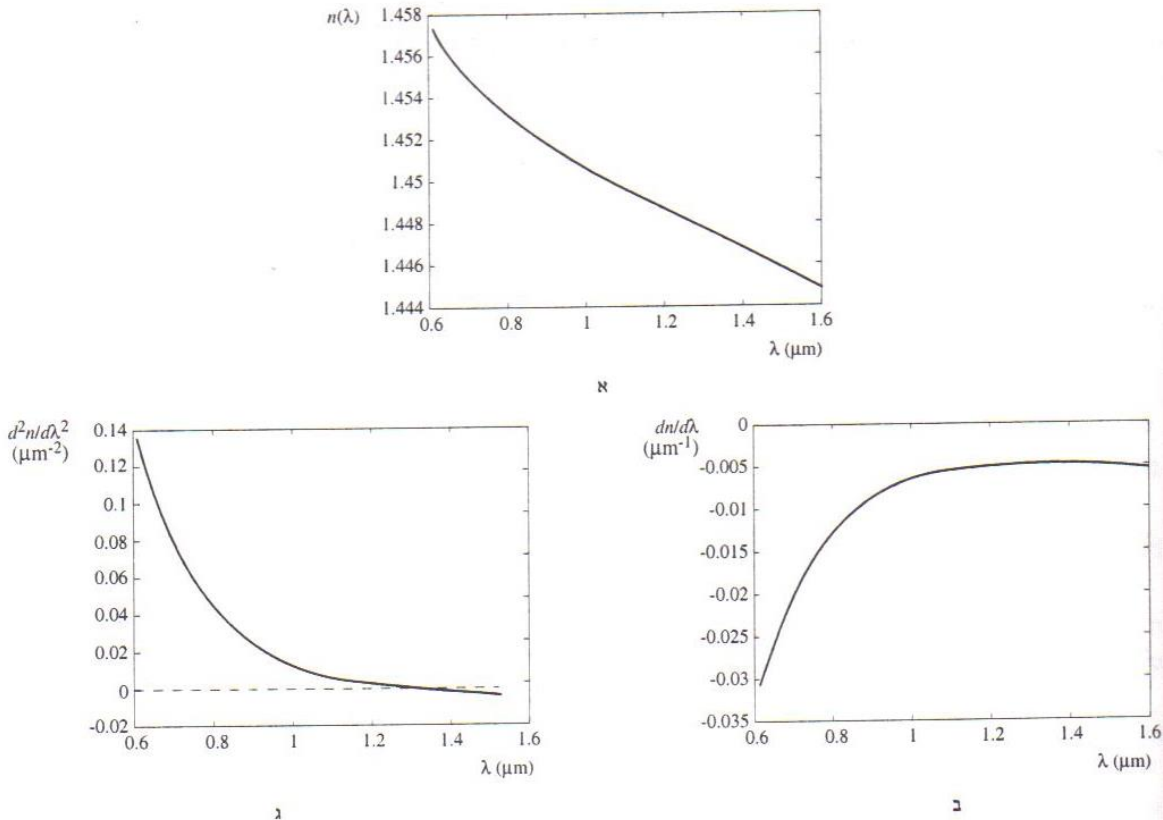
השינוי של n כתלות ב λ , $n(\lambda)$, מכונה נפיצת חומר (*material dispersion*). נפיצת החומר מגבילה גם היא את קצב הנתונים שסיב מסוגל להעביר, כאשר קצב הנתונים הולך ביחס הפוך ל

$$\lambda^2 \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$

כפי שניתן לראות באיור, בגרף $n(\lambda)$ עבור סיליקה קיימת נקודת פיתול, נקודה בה יש מעבר

מקמירות לקעירות. באורך גל זה לגרף הנגזרת הראשונה $\frac{dn}{d\lambda}$ יש נקודת מקסימום, כך שהנגזרת

השנייה $\frac{d^2n}{d\lambda^2}$ מתאפסת. בסביבת אורך הגל הזה קצב הנתונים יכול להיות גבוה ביותר.



איור 8: בגרף $n(\lambda)$ עבור סיליקה קיימת נקודת פיתול, נקודה בה יש מעבר מקמירות לקעירות. באורך גל זה לגרף הנגזרת הראשונה יש נקודת מקסימום, כך שהנגזרת השנייה מתאפסת. בסביבת אורך הגל הזה קצב הנתונים יכול להיות גבוה ביותר.

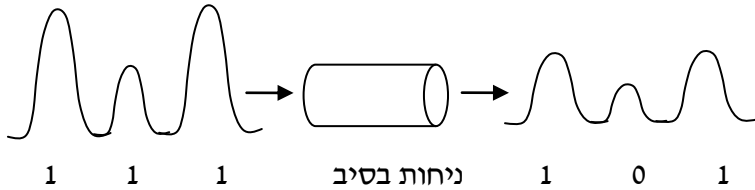
מאפייני הסיב

מאפייני הפעולה של סיב, כמו ניחות ונפיצה, תלויים בהרכב החומר, בצורת הסיב, בגודלו ובאורך הגל והם משפיעים על ביצועי הסיב, כפי שנפרט להלן.

ניחות בסיב

הניחות בסיב מוגדר על ידי: $Attenuation = \frac{P_{out}}{P_{in}}$, כאשר P_{in} הינו ההספק הנכנס לסיב ו P_{out} הינו ההספק היוצא מהסיב. נוח למדוד ניחות ביחידות לוגריתמיות (דציבלים), כאשר:

$$Attenuation_{dB} = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$



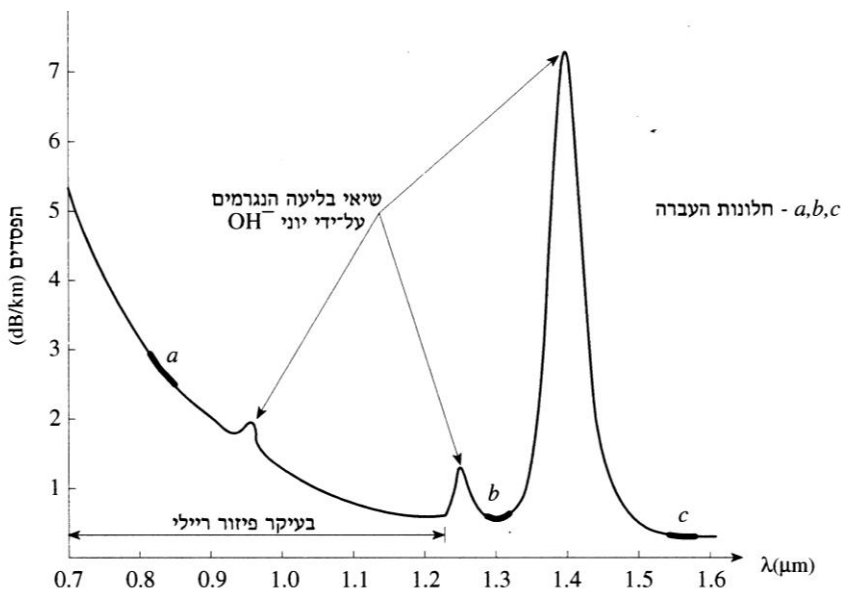
איור 9: ניחות בסיב עלול לשבש את האות הנכנס

כמו כן הניחות גדל עם אורך הסיב ולכן ההתייחסות תהיה בדרך כלל ליחידות dB/km (האוניברסיטה הפתוחה, 1997).

קיימים שלושה גורמים בסיסיים לניחות בסיב:

1. הפסדי בליעה בחומר- נגרמים כתוצאה מפעולה הדדית בין האור למולקולות המרכיבות את הסיב. כמו כן הבליעה בחומר מקורה גם בזיהומים בסיב.
2. פיזור אור- חלק מן האור מתפזר עקב פגמים מבניים וזיהומים בחומר. האור המתפזר אינו מתקדם בסיב ולמעשה הולך איבוד.
3. הפסדי מנחה גל- אלו הפסדים הנגרמים בשל פגמים ועיוותים במבנה הסיב ובשל כיפופים.

הפסדים אלו תלויים באורך הגל ועל ידי בחירה נכונה של אורך הגל ניתן להגיע לצמצום מירבי שלהם, כפי שנרחיב מיד.



איור 10: הפסדים כתלות באורך גל- ההפסדים שמקורם בבליעה של אטומי החומר עצמו הם קטנים יחסית ולכן בד"כ ניתן להזניח אותם. את ההפסדים הנובעים מזיהומים ניתן להפחית באמצעות שיפור תהליכי ייצור. ההפסדים הגדולים ביותר נגרמים על ידי יוני OH ואותם קשה מאוד להפחית.

הפסדי בליעה בחומר

ההפסדים שמקורם בבליעה של אטומי החומר עצמו הם קטנים יחסית ולכן בד"כ ניתן להזניח אותם. את ההפסדים הנובעים מזיהומים ניתן להפחית באמצעות שיפור תהליכי ייצור. ההפסדים הגדולים ביותר נגרמים על ידי יוני OH ואותם קשה מאוד להפחית. זיהומים אלו גורמים הפסדים גבוהים בתחומי אורך גל מסוימים כפי שניתן לראות באיור:

פיזור אור בסיב

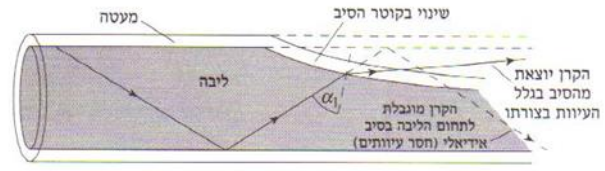
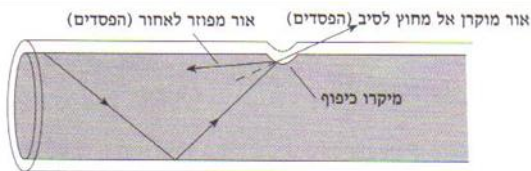
כאשר אור מפוזר כתוצאה משינוי צפיפות החומר ישנו הפסד בהספק. שינוי צפיפות החומר גורם לשינוי מקומי במקדם השבירה. שינוי כזה, כלומר מכשול, כאשר מימדיו קטנים מאורך הגל, גורם להפסדים שמקורם בפיזור ריילי. תופעה זו הינה חלק מתהליך הייצור ולא ניתן להסיר אותה.

המכשול דומה למקור נקודתי המפזר אור לכל הכיוונים. פיזור ריילי תלוי באורך הגל ביחס $\frac{1}{\lambda^4}$

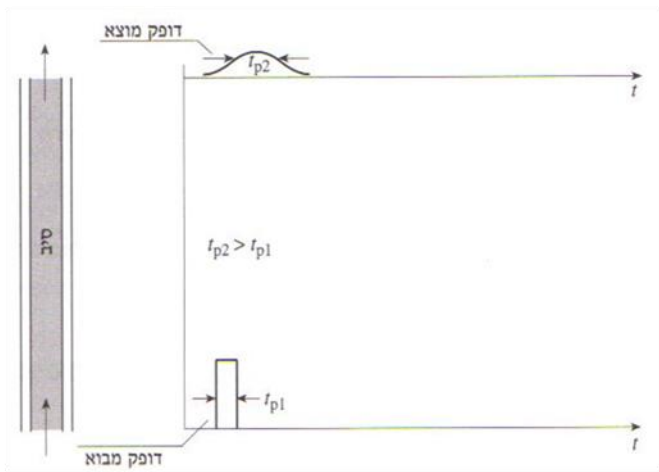
ולכן ככל שאורך הגל ארוך יותר ההפסדים קטנים יותר (האוניברסיטה הפתוחה, 1997).

הפסדי מנחה גל וכיפופים

שינויים מבניים בסיב או עיוותי צורה גורמים לזליגת אור מהסיב. באיזור העיוות הזווית בה פוגעת הקרן קטנה מהזווית הקריטית כך שהקרן חודרת אל המעטפת ויוצאת מהסיב. אפילו שינויים זעירים ביותר בגודל הליבה (מיקרו כיפופים), גורמים גם הם לזליגת אור מהסיב.



איור 11: הפסדים הנגרמים בשל שינויים בקוטר הסיב או כיפופים (האוניברסיטה הפתוחה)



איור 13: המונח נפיצה (dispersion) מתאר תופעה של התרחבות דופק האור במהלך התקדמותו בסיב.

נפיצה

המונח נפיצה (dispersion) מתאר תופעה של התרחבות דופק האור (pulse broadening) במהלך התקדמותו בסיב. ניתן להגדיר נפיצה כרוחב דופק המוצא כאשר רוחב דופק המבוא הוא כמעט אפס. עבור רוחב כניסה t_{p1} ורוחב מוצא t_{p2} , מתקיים תמיד $t_{p2} > t_{p1}$. נגדיר נפיצה

$$\text{על ידי: } \Delta t = \sqrt{(t_{p2}^2 - t_{p1}^2)}$$

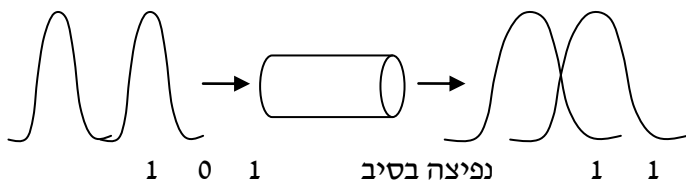
נפיצה נמדדת ביחידות של זמן בסדרי גודל nsec-psec, והיא תלויה באורך הסיב. ככל שהסיב ארוך יותר הנפיצה גדולה יותר, לכן עבור

סיב הנפיצה הכוללת תהיה:

$$\Delta t = L \cdot [\text{נפיצה} / \text{km}]$$

כפי שנרחיב בהמשך, הנפיצה עלולה לגרום לעיוות האות, כאשר שני פולסים של אור מתחילים

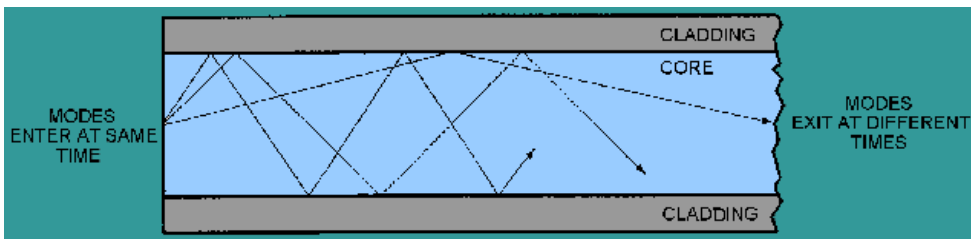
לחפוף אחד את השני, כך שבמקום לקבל שידור של 101, לדוגמא, מקבלים 111. ניתן לחלק את תופעת הנפיצה לשתי קטגוריות כלליות, נפיצה בין אופנית ונפיצה תוך אופנית.



איור 13: הנפיצה עלולה לגרום לעיוות האות. כאשר שני פולסים של אור מתחילים לחפוף אחד את השני, כך שבמקום לקבל שידור של 101, לדוגמא, מקבלים 111.

נפיצה בין אופנית

נפיצה בין אופנית (*intermodal dispersion*) נובעת מחלוקת האות בין כמה אופנים, כשלכל אחד מהם מהירות שונה. כתוצאה מכך נוצר הפרש בין זמן ההגעה של חלקי האות למוצא הסיב (האוניברסיטה הפתוחה, 1997). כדי לחדד את הבנת התופעה ניתן להביט בשני אופנים קיצוניים



המתקדמים לאורך הסיב, האופן הקריטי המתקדם בזווית קריטית θ_c ואופן אפס המתקדם לאורך הציר. דופק אור המשוגר לסיב יתחלק בין שני אופנים אלו ויתקדם בהם לאורך הסיב.

איור 14: נפיצה בין אופנית (*intermodal dispersion*) נובעת מחלוקת האות בין כמה אופנים, כשלכל אחד מהם מהירות שונה. כתוצאה מכך נוצר הפרש בין זמן ההגעה של חלקי האות למוצא הסיב.

נראה לכאורה כי הדרך שעובר האופן הקריטי ארוכה מזו של אופן האפס, לכן לכאורה מהירות ההתקדמות שלו לאורך הסיב תהיה איטית יותר, אולם לאמיתו של דבר המצב הפוך. וקטורי הגל של שני האופנים הללו בליבה זהים בגודלם ושונים בכיוונם. בשני המקרים הגל מתפשט בליבה

שמקדם השבירה שלה זהה n_1 , לכן גודלו של וקטור הגל הוא $k = \frac{2\pi n_1}{\lambda}$. מהירות הפאזה (מופע),

שהיא למעשה מהירות התפשטות האופן לאורך הסיב נקבעת על ידי רכיב וקטור הגל בכיוון z , k_z

$$v_{ph} = \frac{\omega(k)}{k} \text{ : וכפי שהגדרנו לעיל}$$

$$k_z^0 = k_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda}$$

גודלו של k_z שונה בשני האופנים:

$$k_z^c = k_1 \cos \theta_c = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \cos \theta_c$$

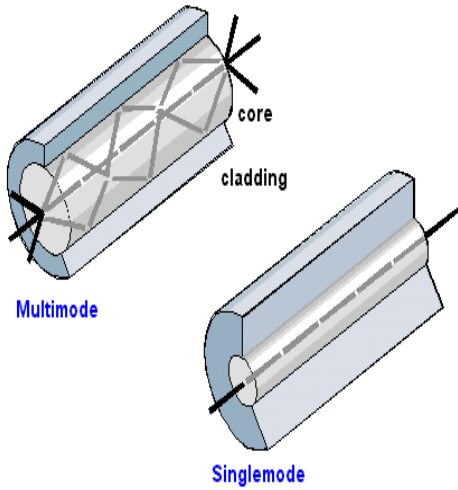
לכן מהירות המופע של שני האופנים בכיוון z , כלומר מהירות ההתפשטות לאורך הסיב תהיה שונה, מה שאומר שכל אופן יגיע לקצה הסיב בזמן שונה. דופק האור ההתחלתי, שהוא למעשה חבילת גלים מרוכזת מאוד, מתחיל להתרחב "ולהימרח" כי כל חלק שלו מגיע לסוף הסיב בזמן אחר.

נפיצה בין אופנית קשורה באופן ישיר למפתח הנומרי. מפתח נומרי גדול גורם לנפיצה גדולה. כמו כן בזווית קליטה גדולה אומנם ביתר קלות ניתן להצמיד את האור לסיב אך היא מלווה בהגדלת המפתח הנומרי ובהכרח הגדלת הנפיצה. המשמעות היא ירידה בקצב הנתונים שניתן להעביר בסיב.

נפיצה תוך אופנית

נפיצה תוך אופנית (*intramodal dispersion*) או נפיצה צבעית (*chromatic dispersion*), נובעת מכך שאור בתוך סיב מורכב מחבורת אורכי גל, נפיצה זו קשורה ברוחב הפס של מקור האור $\Delta\lambda$.

סוגי סיבים



איור 15: מראה בתוך הסיב, סיב חד אופני לעומת סיב רב אופני.

סיב מדרגה רב אופניים

כאמור לעיל, האור מתקדם באופנים רבים. ככל שהמפתח הנומרי גדול יותר, מספר רב יותר של אופנים נכנס לסיב, הנפיצה תהיה גדולה יותר וכתוצאה מכך קצב נתונים נמוך יותר. ישנם סיבים המאפשרים כניסה של מספר רב של אופנים, והם נקראים סיבי מדרגה רב אופניים (multimode). בסיבים כאלו קוטר הליבה הוא כ- $50\mu\text{m}$ וקוטר המעטפת הוא כ- $125\mu\text{m}$. בסיבים אלו משתמשים כאשר צריך להעביר כמות גדולה של מידע למרחק קצר, כמו בנייתוחים לדוגמא. כפי שציינו הנפיצה תלויה באורך הסיב, לכן עבור מרחק קצר היא תהיה פחות משמעותית.

סיבי מדרגה חד-אופניים

בסיב חד אופני (singlemode) האור מתפשט באופן יחיד או אופנים בודדים. ניתן להשיג זאת על ידי הקטנת ההפרש היחסי בין מקדמי השבירה או על ידי הקטנת קוטר הליבה של הסיב. בסיבים חד אופניים קוטר הליבה הוא $5-10\mu\text{m}$ וקוטר המעטפת הוא $125\mu\text{m}$. כתוצאה מכך ומבחינה של הפרש קטן מאוד בין מקדמי השבירה כדי שקרן תיכנס לסיב, עליה לפגוע כמעט בניצב לקצה הסיב.

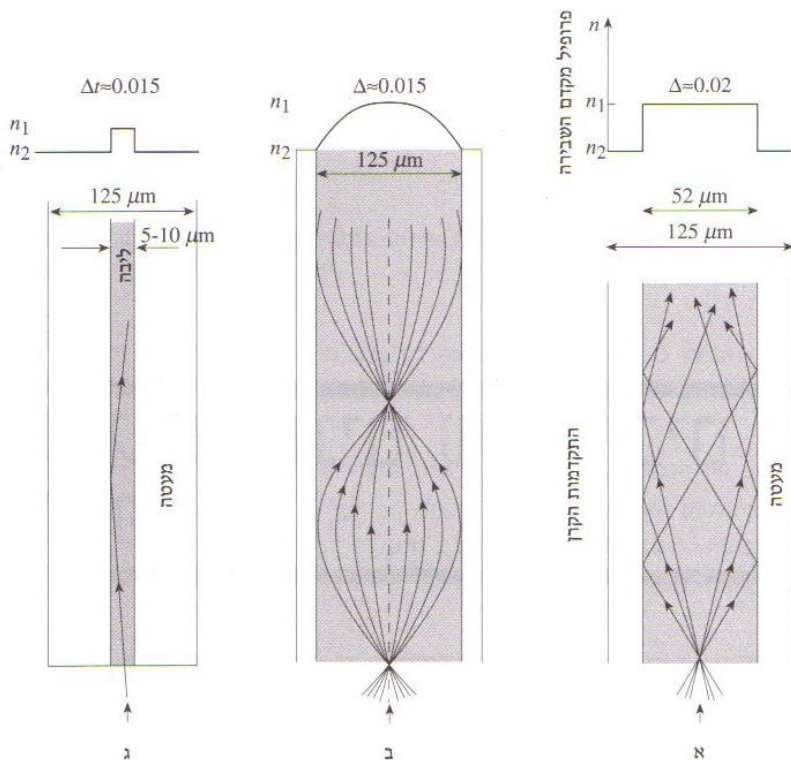
על ידי בחירה מתאימה של חומר הליבה, מימדי הסיב ואורך הגל ניתן להשיג בסיב חד אופני

נפיצה קטנה ביותר כך שהסיב המתקבל מתאים להעברת נתונים בקצב גבוה.

בסיב חד אופני (בניגוד לרב אופני) חלק מהאור מתקדם בתוך המעטה. לכן המעטה חייב להיות עבה יחסית ובעל הפסדים נמוכים.

סיב בעל מקדם שבירה הדרגתי

זהו סיב בו מקדם השבירה קטן בהדרגה מן המרכז החוצה באופן רצוף כפונקציה של הרדיוס, ומתקיימת שבירה הדרגתית של הקרניים. פילוג מקדם השבירה (האופן בו משתנה מקדם השבירה בחתך הסיב) האופטימלי הוא פרבולי, כאשר מספר האופנים בסיב הדרגתי פרבולי הוא כמחצית ממספר האופנים בסיב מדרגה דומה.



איור 16: התקדמות האור בסיבים שונים. א. סיב מדרגה רב-אופני, ב. סיב הדרגתי, ג. סיב מדרגה חד אופני.

כמו כן, הפרש הדרכים האופטיות בין הקרניים של האופנים השונים קטן בהרבה מאשר בסיב מדרגה רב-אופני. כלומר: בסיב הדרגתי בעל פילוג מתאים של מקדם שבירה (המשפיע על מהירות האור) ניתן לקבל שוויון של הדרכים האופטיות, דבר שאינו אפשרי בסיב מדרגה רב אופני בו מקדם השבירה בליבה אחיד. הנפיצה הבין אופנית בסיב פרבולי הדרגתי קטנה בכמה סדרי גודל מסיב מדרגה רב-אופני בעל נתונים דומים.

מימדי הסיב דומים לסיב מדרגה אך יצור סיב הדרגתי מורכב יותר. זווית הקליטה האפקטיבית של סיב הדרגתי, קטנה במעט מזו של סיב מדרגה בעל הפרש זהה של מקדמי השבירה, עקב כך הצימוד של מקור האור אל הסיב ההדרגתי קשה מעט יותר.

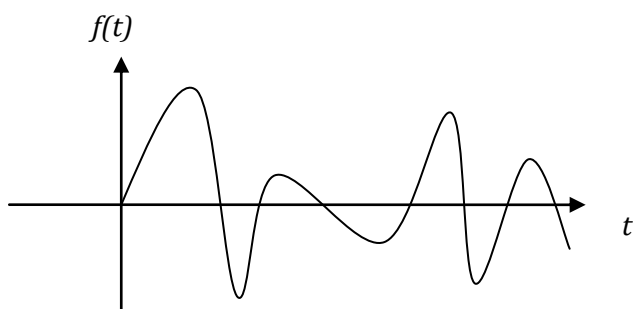
סיבים פלסטיים וסיבי זכוכית

לסיב בעל מעטה פלסטי מאפיינים דומים לסיב שכולו עשוי זכוכית אך הוא רגיש יותר לפגיעות מכניות ולשחיקה. סיב פלסטי לחלוטין הוא חזק יותר מכנית וקל לצמד לתוכו אור. מאפייני ההעברה שלו טובים פחות מסיב בעל מעטה פלסטי. ההפסדים בו גדולים הרבה יותר ורוחב הפס שלו קטן מזה של סיב זכוכית. כיוון שקל יותר לטפל בו והוא אינו נשבר בקלות משתמשים בו לעיתים קרובות בישומי תקשורת למרחקים קצרים שדורשים רוחב פס קטן כמו טלוויזיה במעגל סגור.

עקרונות תקשורת

כדי להעביר מידע משתמשים באות שמשנתנה בזמן. אות קבוע בזמן (כמו $\cos(\omega t)$, לדוגמה) אינו מכיל מידע, המידע הוא למעשה השינוי של האות בזמן (כץ, 2011). זו הסיבה שבמערכת השמע, שינויים איטיים מאוד או מהירים מאוד אינם נקלטים (פחות מ 20Hz ויותר מ 20kHz), המערכת לא מבחינה בשינוי ולא קולטת את המידע. כאמור לעיל, רוחב תחום התדרים של האות נקרא רוחב סרט. אם כך, רוחב הסרט של מערכת השמע הוא $20\text{Hz} - 20\text{kHz}$, ולאות סינוס יש רוחב סרט 0, כלומר הוא לא מכיל מידע בכלל.

בכל מערכת תקשורת המידע המועבר יכול להיות אות אנלוגי או דיגיטלי (Agrawal, 2002). באות אנלוגי עוצמת האות (הזרם החשמלי) משתנה כפונקציה של הזמן. דוגמאות נפוצות הן מיקרופון שממיר קול או מצלמת וידאו שממירה תמונה לאות חשמלי. האות הדיגיטלי, בניגוד לכך, לוקח רק ערכים בדידים ומשדר אותם במרווחי זמן שונים. דוגמה ידועה לאות דיגיטלי הם נתוני מחשב. בתקשורת אופטית מקובל כיום להשתמש באות דיגיטלי.



איור 17: צורה אקראית של אות אנלוגי.

אות אנלוגי ודיגיטלי

אות אנלוגי

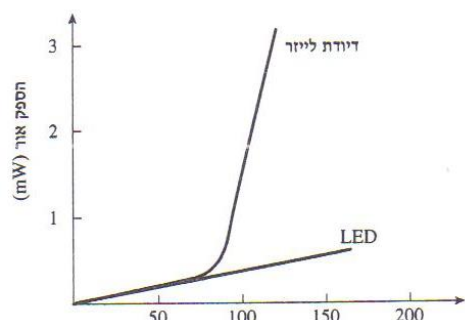
מאפיין השידור אנלוגי הוא עוצמת האות המשתנה בזמן. מכיוון שיש תלות מוחלטת בעוצמת האות המשודר ורוצים שהאות הנקלט יהיה העתק מדוייק של האות המשודר, חייבים להתקיים כמה תנאים:

המערכת חייבת להיות ליניארית, בעלת זמן תגובה קצר (רוחב פס גדול) ובעלת רעש פנימי נמוך.

דיודה פולטת אור (LED) היא כמעט ליניארית ולכן היא מתאימה לשידור אנלוגי. אבל, ההספק ההתחלתי שלה נמוך יחסית, ומה שעובר בתוך הסיב נמוך עוד יותר, מה שעושה את השידור מאוד רגיש לרעש. דיודת לייזר לעומת זאת היא ליניארית בתחום אחד, וליניארית גם בתחום שני אבל בין התחומים יש אי ליניאריות חדה כמתואר באיור (האוניברסיטה הפתוחה, 1997).

בתחום הנמוך אין יתרון ממשי על הדיודה פולטת אור ובתחום הגבוה דרושים מעגלים מייצבים מיוחדים כדי לשמור על ההספק הגבוה. משום כך דיודת הלייזר משמשת רק לעיתים רחוקות בשידור אנלוגי. הסיב הוא רכיב פאסיבי והוא יכול להיחשב ליניארי.

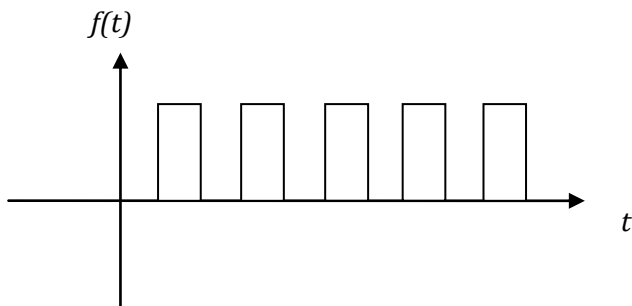
זמן התגובה של המערכת חייב להיות שווה או קטן מזמן התגובה של האות. מנקודת ראות אחרת, רוחב הפס של המערכת, או התדירות הגבוהה ביותר שהמערכת יכולה לקלוט מבלי לגרום לעיוותים, חייב להיות גבוה מרוחב הסרט של האות.



איור 18: דיודה פולטת אור (LED) היא כמעט ליניארית ולכן היא מתאימה לשידור אנלוגי. אבל, ההספק ההתחלתי שלה נמוך יחסית. דיודת לייזר היא ליניארית בתחום אחד וליניארית גם בתחום שני אבל בין התחומים יש אי ליניאריות חדה.

במערכת אנלוגית אחת המגבלות העיקריות היא הרעש במערכת, כאשר הרעש יכול להיות פנימי או חיצוני. רעש חיצוני ניתן להפחית על ידי בידוד המערכת וסינון הרכיבים השונים, אולם רעש פנימי שגורמים הרכיבים השונים בתוך המערכת קשה מאוד להפחית. כדי שיהיה ניתן לשחזר את האות בנאמנות, ההספק של האות במוצא (בגלאי) חייב להיות גבוה מהספק הרעש, כלומר יחס האות לרעש (S/N single to noise ratio) חייב להיות גבוה הרבה מאחד. בגלל ההספק הנמוך של הדיודה פולטת אור והרעש הפנימי שנוצר ניתן להשתמש בשידור אנלוגי ישיר רק למרחקים קצרים. במרחקים ארוכים יש ניחות גדול בסיב האופטי ויחס ה S/N קטן.

אות דיגיטלי



איור 19: אות דיגיטלי

בשידור דיגיטלי משדרים וקולטים דפקים (*pulses*) של אור, שיש להם רק שתי רמות, נמוכה וגבוהה, *off* ו *on*, או 0 ו 1. הצורה הפשוטה ביותר- יש זרם או אין זרם (אור וחושך), זו צורה בינארית. בשידור דיגיטלי אין חשיבות לליניאריות וההשפעה של הרעש מופחתת מאוד מכיוון שהמערכת צריכה להיות מסוגלת להבחין בין שתי רמות בלבד, ובדרך כלל הן נבדלות זו מזו באופן ברור.

2 האפשרויות של הצורה הבינארית מכונות סיביות או ביטים, "ביט 1" (יש זרם/ אור) ו"ביט 0" (אין זרם/ אור). כל ביט נמשך פרק זמן מסויים T_b , הנקרא גם *bit slot*. אם כך ניתן להגדיר את

$$B = Tb^{-1}$$

קצב הסיביות B (bit rate) כמספר הביטים לכל שניה, כאשר

המידע הדיגיטלי משודר בערוץ התקשורת בצורת סמלים שונים, כך שכל סמל שווה ערך למספר סיביות (האוניברסיטה הפתוחה, 2004). כסמל יכול לשמש שינוי במופע, בתדר, בעוצמת האות המשודר או שילוב של כל אלה. מספר הסמלים המשודר בשניה נקרא *baud* וניתן להגדיר את קצב השידור (*baud rate*) כמספר הסמלים בשניה. קצב זה משתנה לפי תבנית הסיביות ושיטת הקידוד בה משתמשים. במערכות בינאריות, בהן יש רק שתי רמות, לעיתים קרובות לא מבחינים בין המושגים קצב הסיביות לקצב השידור. קצב הסיביות קשור גם לרוחב הפס, תחום התדרים המשודרים קובע כמה סיביות ניתן יהיה לשדר בשניה מבלי לעוות את האות.

המרת אות אנלוגי לדיגיטלי

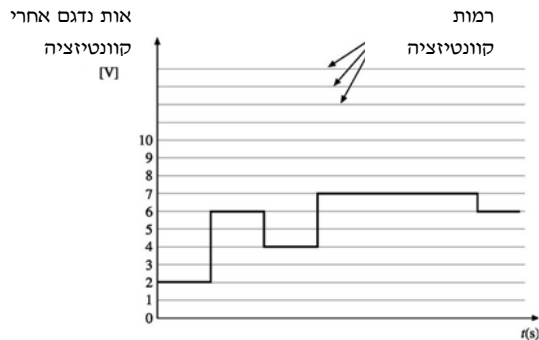
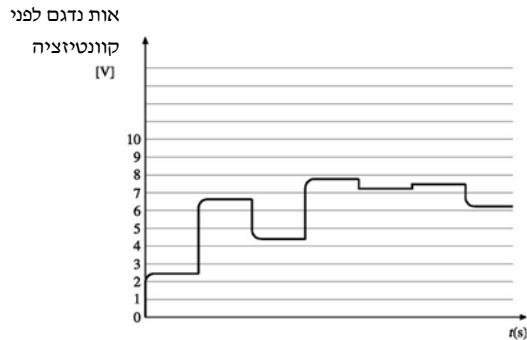
אות אנלוגי הוא אות רציף בזמן, בעוד אות דיגיטלי הוא אות בדיד בזמן. כדי להעביר אות אנלוגי לדיגיטלי יש לבצע כמה פעולות בסיסיות – דגימה, קוונטיזציה וקידוד:

דגימה:

הדגימה היא ליקוט של ערכי האות האנלוגי במרווחי זמן קבועים Δt וקצרים מאוד (כדי שהאות לא ישתנה במהלך הדגימה). קצב הדגימה (תדירות הדגימה) נתון על ידי: $f_s = 1/\Delta t$. למעשה, דגימה היא כמו הכפלת הפונקציה המקורית בפונקציית המסרק: $\sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - n\Delta t)$, כך

שההכפלה נותנת מסרק של פונקציית דלתא שכל אחת בגובה האות המקורי באותה נקודה (כך), (2011).

קצב הדגימה נקבע לפי רוחב הסרט Δf , של האות האנלוגי. על פי "תאוריית הדגימה" (משפט הדגימה), אות שמוגבל ברוחב הסרט יכול להיות מיוצג באופן מלא מבלי לאבד מידע על יד דגימות



איור 20: לאחר הדגימה מבצעים קוונטיזציה של האות שערכו משתנה בצורה רציפה. המטרה היא לחלק את תחום המתח האינסופי לתת תחומים צרים. ככל שכל תת תחום יהיה צר יותר, כך רמת הדיוק תגדל. בתהליך הקוונטיזציה נוצרת שמהווה למעשה "רעש" שנוסף לאות המקורי ומכונה "רעש הקוונטיזציה".

דיסקרטיות, בתנאי שתדירות הדגימה f_s מספקת את התנאי $f_s \geq 2\Delta f$. הגבלת רוחב הסרט (או התדירות הגבוהה ביותר) קובעת את קצב השינוי של המידע, ולכן אם דוגמים בקצב הגדול לפחות פי 2 מהתדירות הגדולה ביותר מבטיחים שלא יאבד מידע (agrawal, 2002).

קוונטיזציה:

לאחר הדגימה מבצעים קוונטיזציה של האות. ערכו של המתח שנדגם משתנה בצורה רציפה. מטרת פעולת הקוונטיזציה היא לחלק את תחום המתח האינסופי לתת תחומים צרים, כאשר לכל תת תחום צר יש ערך בדיד המתואר באמצעות מספר מייצג. ככל שכל תת תחום יהיה צר יותר, כך רמת הדיוק תגדל. בתהליך הקוונטיזציה נוצרת שגיאה כפי שניתן לראות באיור 20 (מתוך האוניברסיטה הפתוחה, 2004). השגיאה הזו מהווה למעשה "רעש" שנוסף לאות המקורי ומכונה "רעש הקוונטיזציה".

קידוד:

לאחר הדגימה והקוונטיזציה האות המקורי הפך לסידרה של ערכים בדידים. ערכים אלו מיוצגים על ידי קוד בינארי, וקוד זה הוא האות המשודר.

אפנון וריבוב

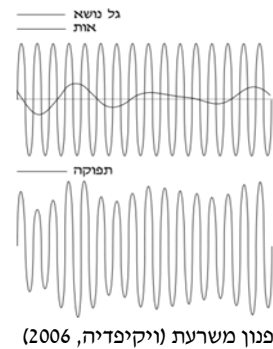
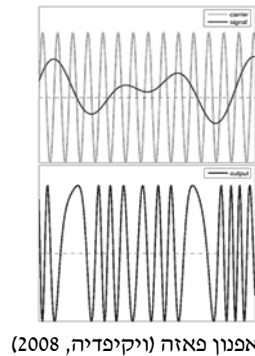
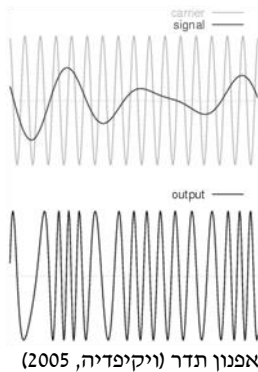
במערכות תקשורת מתקדמות (יחסית) לא משדרים את האות עצמו אלא אות מאופנן, בו במידע מורכב על גל נושא (carrier), \sin או \cos . כך התדר המשודר שונה מהתדר של האות, אבל הוא מכיל את אותו מידע. הגל הנושא במקרה של סיב אופטי הוא גל אור. לאפנון סיבות רבות, מהן (כך, 2011):

- הקצאת תדרים לתחנות שידור שונות כדי לשדר מספר אותות במקביל.
- שימוש באנטנה סבירה: אנטנה צריכה להיות בגודל של כמחצית אורך גל, ובתדרי השמע זה סדר גודל של כמה מאות ק"מ. העברה לגל נושא עם תדירות גדולה יותר (סדר גודל של MHz) מאפשר שימוש באנטנה סבירה, של מטרים בודדים.
- הקטנת רוחב סרט אפקטיבי (רוחב פס חלקי תדר מרכזי).
- ריבוב תדרים (נרחיב בהמשך).

במערכות הישנות של תקשורת אופטית היה שימוש נרחב באפנון עוצמה (אפנון אמפליטודה), במערכות כאלו עוצמת האור המשודר מייצגת את אמפליטודת האות. הגילוי של האות הוא גילוי ישיר, לא צריך לפענח את האות הנקלט, עוצמת האור הנקלט מעידה על האות ששודר. במערכות המודרניות מקובל להשתמש במערכות קוהורנטיות – בהן המשדר מבצע אפנון תדר או אפנון מופע, והמקלט מבצע גילוי עקיף או גילוי קוהרנטי. בשיטות אלו יחס האות לרעש גבוה הרבה יותר וכמו כן גם קצב השידור.

אפנון אות אנלוגי

בתקשורת אופטית, הגל הנושא לפני האפנון הוא: $E(t) = \hat{e}A \cos(\omega_0 t + \phi)$ כאשר \hat{e} הוא וקטור יחידה של הפולריזציה, קובע את כיוון הפולריזציה. $E(t)$ זה השדה החשמלי, A זו האמפליטודה, ω_0 היא תדירות הגל הנושא ו ϕ היא הפאזה. אפשר לאפנן את האמפליטודה A , את התדירות ω_0 או את הפאזה ϕ . באות אנלוגי האפנונים הללו נקראים אפנון משרעת, אפנון תדר ואפנון פאזה (Agrawal, 2002).



איור 21: סוגים שונים של אפנון אות אנלוגי

אפנון משרעת (Amplitude Modulation):

צורת אפנון זו מתבססת על שינוי בעוצמתו של הגל הנושא, שינוי במשרעת שלו (כך, 2011). אם הגל הנושא הוא $\hat{e}A \cos(\omega_0 t + \phi)$ בתדר ω_0 , והאות אותו אנו מעוניינים לשדר הוא $f(t)$, אז כאשר נרכיב אותם אחד על השני נקבל: $S(t) = (1 + mf(t))A \cos(\omega_0 t + \phi)$ הגל הנושא הוא הקוסינוס, והוא מתנדנד בתוך מעטפת שהיא האות המקורי. חייבים להוסיף את הקבוע m (נקרא עומק המודולציה) ל $f(t)$, כך שאמפליטודת האפנון הכוללת לא תהיה שלילית, כדי שלא יתקבל דו משמעות. אם נאפשר אמפליטודה שלילית, וגם הגל הנושא נהיה שלילי, נקבל אותו דבר כמו אמפליטודה חיובית וגל נושא חיובי (כלומר בפאזה הפוכה). כך לא נוכל לדעת מה באמת שודר. כדי למנוע את הדו משמעות הזו צריך לדאוג לכך שהגודל $(1 + mf(t))$ תמיד יהיה חיובי.

אפנון פאזה (Phase Modulation):

באפנון פאזה מרכיבים את האות אותו רוצים לשדר $f(t)$ בתוך הפאזה של הגל הנושא:

$$S(t) = A \cos(\omega_0 t + mf(t) + \phi)$$

כלומר הפאזה של הגל תהיה חיבור של הפאזה המקורית של הגל הנושא עם האות מוכפל ב m , המקביל לעומק המודולציה באפנון AM.

אפנון תדר (Frequency Modulation):

באפנון תדר אנו רוצים שהתדר בכל רגע יהיה מתכונתי עם האות המשודר (כך, 2011). התדר הרגעי הוא קצב צבירת הפאזה של הגל, או הקצב בה משתנה הפאזה של הגל. כביטוי מתמטי אפשר לרשום את התדר הריגעי כ $\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$. בגל קוסינוס לדוגמא, יהיה התדר הריגעי:

$$\omega(t) = \frac{d(\omega_0 t)}{dt} = \omega_0$$

כדי להשתמש בתדר הריגעי לצורך אפנון של אות $f(t)$ נשדר אות מהצורה:

$$S(t) = A \cos\left(\int_0^t (\omega_0 + mf(t')) dt' + \phi\right)$$

כלומר אות שהתדר הרגעי שלו הוא חיבור של התדר הנושא והאות:

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \omega_0 + mf(t)$$

נשים לב כי למעשה אין הבדל מתמטי בין אפנון פאזה לאפנון תדר. אפנון תדר הוא למעשה אפנון פאזה עם אות מאופנן $\int_0^t (mf(t')) dt'$ (זו התוספת לפאזה). אפנון תדר הוא אפנון פאזה עם מניפולציה נוספת על האות. נציין כי מושג התדר המדובר כאן שונה מהותית ממושג התדר בפירוק פוריה.

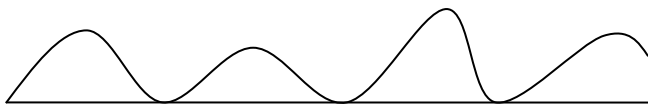
אפנון אות דיגיטלי

באפנון אות דיגיטלי משתמשים בשיטות הדומות מאוד לאפנון אות אנלוגי, עם דגשים מיוחדים לאותות בדידים.

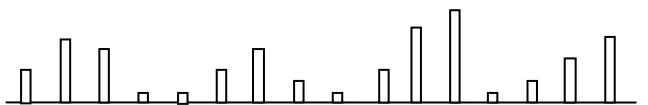
אפנון משרעת דופק (pulse amplitude modulation) PAM:



גל נושא-פולסים



אות מבוא



גל נושא- פולסים מאופנן

איור 22: באפנון משרעת דופק המשרעת של אות המבוא מכתובה את המשרעת של האות הדיגיטלי.

צורת אפנון זו מאוד דומה לאפנון AM. המשרעת של אות המבוא מכתובה את המשרעת של האות הדיגיטלי, כלומר גובהו של כל פולס מתכונתי לגובה האות כפי שניתן לראות באיור. בשיטה זו צריך להבחין לא רק האם יש פולס או לא, אלא גם מה גובה הפולס. לכן שיטה זו מאוד רגישה להפרעות ולרעש ולא מרבים להשתמש בה.

אפנון קוד דופק PCM (pulse code modulation):

באפנון זה דוגמים את אות המבוא בדומה לאפנון משרעת הדופק, אולם כאן ממירים את ערך גובה האות לקוד בינארי ומשדרים את הקוד הבינארי. למעשה, האות המשודר מכיל רק שתי רמות, ולכן קל להבחין בין הרמות והרעש לא מהווה בעיה חמורה כמו באפנון PAM. זו צורת האפנון המשמשת לרוב בתקשורת אופטית. יש עוד שתי שיטות אפנון, פחות נפוצות:

אפנון מיקום דופק PPM (pulse position modulation):

מיקום הדופק בתוך חריץ הזמן של הסיבית (bit slot) הוא מדד לגובה המשרעת של האות.

אפנון רוחב דופק PDM (pulse duration modulation):

רוחב הדופק בתוך חריץ הזמן של הסיבית (bit slot) הוא מדד לגובה המשרעת של האות.

ריבוב

ריבוב (multiplexing) הוא שידור מידע המגיע ממקומות שונים ולא תלויים דרך ערוץ תקשורת אחד (במקרה שלנו- סיב אופטי). קיימות כמה אפשרויות לריבוב: ריבוב בחלוקת זמן, ריבוב בחלוקת תדר וריבוב בחלוקת אורך גל.

ריבוב בחלוקת זמן TDM (time division multiplexing):

זמן השידור בערוץ מתחלק בין מקורות מידע שונים וכל אחד עושה שימוש בערוץ בתורו. לכל מקור מוקצה חלון זמן, (time slot) שבו הוא משדר את הנתונים שלו. נניח אם יש 4 מקורות, כאשר מקור מס' 4 מסיים את השידור, חלון הזמן הבא מוקצה לשידור של מקור 1. יש שיטות בהן חלוקת הזמן היא קבועה ויש שיטות בהן למקורות שיש להם מידע רב יותר מוקצים חלונות זמן לעיתים תכופות יותר.

ריבוב בחלוקת תדר FDM (frequency division multiplexing):

רוחב הפס של ערוץ המידע מחולק לחלונות תדר, כך שכל מקור משדר גל נושא בתדרים שונים ופסי התדרים מופרדים בפסי הגנה המיועדים להקל על שיחזור המידע. אפשר להתייחס לגל הנושא של כל מקור כאל תת-נושאים (subcarriers).

בצד הקולט יש מאגר של מסננים מעבירי פס, וכל אחד מהם מאפשר רק לתחום תדירות אחד לעבור, כך שרוחב הפס של כל מסנן מתאים לרוחב פס של גל תת נושא אחד. אם רוחב הפס של תת נושא הוא לדוגמה 5-10MHz, כך יהיה גם רוחב הפס של המסנן.

יש לשים לב במקרה זה כי אם קיימים מקורות אור רבים המשדרים באותו זמן, עלולה להיווצר הפרעה בקליטת האותות. עוצמת האור בגלאי היא סכום של העוצמות של כל אותות האור הנקלטים והוא עלול להגיע לרוויה. במצב רוויה יכול להיגרם עיוות לאות ואף ייתכן שהמערכת לא תוכל לפעול.

ריבוב בחלוקת אורך גל WDM (wavelength division multiplexing):

בשיטה זו לכל מקור מוקצה אורך גל מרכזי לשידור וכל מקור משדר בתחום צר של אורכי גל סביב ערך מרכזי. בשיטה זו אפשר לבצע ריבוב צפוף יותר מאשר שאר השיטות. כמו כן בכל אורך גל ניתן להשתמש בשיטות האחרות לריבוב כמו TDM ו FDM ובכך להגדיל עוד את מספר הערוצים המשודרים במקביל. בתחום צר מאוד של אורכי גל, נניח ברוחב $10nm$, יש תחום רחב של תדרים אותם ניתן לרבב.

בשיטה זו אין כמעט הפרעה הדדית בין אותות המבוא. גם בשיטה זו עלולה להיות בעיה של רוויה בגלאי האופטי, אך ניתן למנוע אותה על ידי הפרדה בין אורכי הגל עוד לפני פגיעתם בגלאי, כך שכל אורך גל מופנה לגלאי משלו.

היבטים מערכתיים על תקשורת סיב-אופטית

תרשים מלבנים של מערכת תקשורת אופטית:



לעיתים יש צורך בהוספת מהדר (*repeater*) לאורך הסיב כדי להגביר את האות ולעצב אותו מחדש כך שהאות יגיע לגלאי עם פגיעה קטנה ככל שניתן. בתכנון המערכת חייבים להתחשב בכמה שיקולים עיקריים- ההפסדים הכוללים, העיוותים וקצב הנתונים. סיבים חד אופניים מציעים את קצב הנתונים הגבוה ביותר ואת ההפסדים הקטנים ביותר לק"מ. סיב בעל מקדם הדרגתי נמצא במקום השני וסיב מדרגה רב אופני הוא הזול ביותר והנוח ביותר לעבודה אך הוא בעל קצב נתונים נמוך והפסדים גדולים לק"מ.

הפסדים

כדי לאפשר את גילוי האות, עם מספר מינימלי של שגיאות, ההספק האופטי שמגיע לגלאי חייב להיות גדול מהספק הרעש שנקלט. כמו כן ההספק הנקלט חייב להיות גדול מרמת הסף בשיעור מסויים. רמת הסף נקראת גם רגישות המקלט וככל שהרגישות נמוכה מספר השגיאות יקטן. ההספק הנקלט הוא פונקציה של ההספק הכולל של מקור האור, הפסדי הצימוד בין האור לסיב, הפסדי הסיב התלויים באורך הסיב L ובמקדם הניחות A , הפסדי המחברים או המאחים והפסדי הצימוד בין הסיב לגלאי.

שיקול נוסף חשוב הוא תחום שינויי ההספק בהם מהערכת יכולה לפעול. אסור שההספק על הגלאי יהיה גבוה מידי, כדי למנוע רוויה ואסור שיהיה נמוך מידי, כדי להבטיח גילוי של האות. על ההפסדים בסיב, שנגרמים מבליעה, פיזור וכיפופים הרחבנו לעיל. נפרט כאן על הפסדי הצימוד.

הפסדי צימוד אל הסיב וממנו:

בחירת הסיב צמודה לבחירת מקור האור. לדוגמא, סיב חד אופני לא מתאים למקור LED משום שזווית האלומה של הדיודה פולטת אור היא רחבה מאוד ואילו זווית הקליטה של סיב חד אופני

קטנה מאוד. כמו כן שימוש בדיודת לייזר לא מתאים לסיב רב אופני מכיוון שקצב הנתונים של סיב כזה הוא קטן יחסית ויבטל את יתרון הקצב המהיר של הלייזר. בצימוד האור אל הסיב ישנם הפסדים הנובעים משני גורמים עיקריים: אי התאמה בשטח הליבה ואי התאמה במפתח הנומרי.

שטח מקור האור חייב להיות קטן משטח ליבת הסיב כדי למזער הפסדים. ההפסדים הנובעים מחוסר התאמה בשטח נמצאים ביחס ישר לאי התאמה, ואם שטח הסיב גדול משטח המקור לא נגרמים הפסדים בעקבות אי התאמה בשטח.

ההפסדים בעקבות אי התאמה במפתח הנומרי הם תוצאה של זווית קליטה צרה של הסיב בהשוואה לזווית הקרינה של המקור. בהנחה שהמקור הוא לאמברטי (מקור שתבנית הקרינה שלו

היא $I(\theta) = I_0 \cdot \cos \theta$, היחס בין ההספק הנפלט הכולל P_{tot}

להספק המצומד לתוך הסיב P_{coup} הוא בקירוב:

$$\frac{P_{coup}}{P_{tot}} = (N.A.)^2$$

בעיה זו ניתנת לפיתרון בעזרת שימוש באמצעים אופטיים להצרת האלומה (כמו עדשות).

ל LED עם עדשה יש אלומת קרינה צרה (כ 70°) יותר מאשר מקור לאמברטי (כ 120°), ואם משתמשים בסיב חד אופני צריך לבחור כמקור אור דיודת לייזר שהאלומה שלה צרה מאוד (כ 10°).

הבעיות בצד הקולט דומות, אם כי בדרך כלל שטח הגלאים גדול משטח הסיבים.

ההפסדים כתוצאה מהחזרות קטנים מאוד ואפשר למזער אותם ל 0 אם מקטינים את המרחקים בין המקור לסיב ובין הסיב לגלאי.

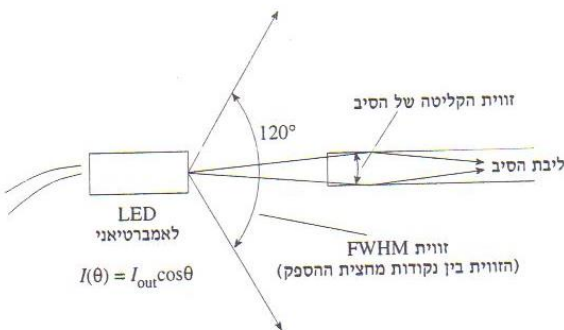
עיוותים

אות העובר בסיב סובל מעיוותים מסיבות שונות, בניהם: נפיצה, זמן העליה ורעש.

השפעות הנפיצה (דיספרסיה):

כאמור לעיל, נפיצה גורמת להתרחבות הדופק, מה שיכול לגרום לשגיאות בקליטה. אם התרחבות הדופק תהיה כזו שסיביות עוקבות מתחילות לחפוף, המידע יכול להתקבל בצורה שגויה כי לא יהיה ניתן להבחין מתי משודר 0 ומתי משודר 1. מצב זה נקרא הפרעה בין סימנית (*inter symbol interference*). הנפיצה קשורה לסוג הסיב, סיבים רב אופניים יתנו נפיצות שונות, תלוי לכמה

אופנים מתאפשר לעבור. הנפיצה תשפיע למעשה על רוחב הפס, כתלות במפתח הנומרי וב Δ . רוחב הפס תלוי גם במרחק אותו השידור אמור לעבור. ככל שהמרחק גדל כך גדלה התרחבות הדופק ולכן לא מספיק לציין את רוחב הפס של הסיב אלא גם את אורכו או המרחק אליו משודרים הנתונים. לכן הוגדר מדד משולב הנקרא קיבולת השידור, שהוא מכפלת רוחב הפס במרחק השידור.



איור 23: צימוד של LED לסיב חד אופני

זמן עליה:

במערכת עם קצב נתונים מסויים, כדי לאפשר קצב זה חייבות להילקח בחשבון ההשפעות מגבילות הקצב של כל רכיבי המערכת.

במערכת ספרתית נוח לדבר על זמן עליה של הרכיבים. אם זמן העליה של המערכת קצר, העיוות של האות יקטן ויהיה אפשר להעביר נתונים בקצב מהיר יותר. אם קצב העליה נמוך, כלומר תגובה איטית של המערכת ויגרם עיוות באות. לעיתים העיוות גדול מידי עד כדי שלא ניתן להבחין בין 0 ל 1 ומתרחשת חפיפה בין סיביות.

רעש:

במערכות אידיאליות האות יכול להתקבל ולהיות מפוענח גם אחרי מרחק מאוד גדול. במציאות זה לא כך, וההבדל העיקרי הוא כי במערכות אמיתיות קיים רעש. במונח רעש כאן נתייחס לאות אקראי שמתחבר לאות המקורי. אילו היה זה אות ידוע שמתחבר, היה ניתן לחסרו כדי לקבל את האות הרצוי. לכן הרעש המפריע הוא דווקא אות אקראי (כך, 2011).

אם כך, בכל חלקי המערכת יש להסתכל גם על רמת הרעש. במערכות אנלוגיות הרעש עלול לעוות את צורת האות. במערכות דיגיטליות הרעש עלול לגרום לשגיאות, שכן רמה 0 יכולה להיקלט כ 1 והפוך. ככלל, יש להסתכל על יחס האות לרעש (S/N single to noise ratio). ככל שהאות יהיה גדול יחסית לרעש כך קטן הסיכוי לשגיאה, כלומר יש לשאוף ליחס S/N גבוה הרבה יותר מאחד.

אות בעל איכות נמוכה הוא כזה שיחס האות לרעש שלו הוא נמוך גם כן, והפוך. "רעש חשמלי" מתייחס לזרם חשמלי אקראי שאינו קשור לזרם האות. זרם הרעש יוצר הפרעה חשמלית ומקשה על גילוי האות. שני מקורות לרעש חשמלי:

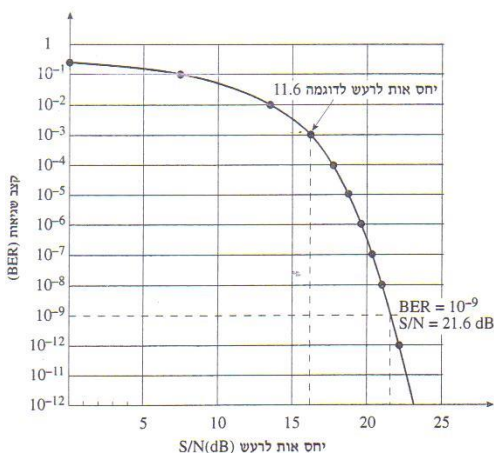
רעש תרמי ($thermal\ noise$), נובע מתנועה אקראית של אלקטרונים בחומר בטמפרטורה שונה מאפס.

רעש "שוט" ($shot\ noise$), נובע מכך שהן תהליך גילוי האור והן זרם חשמלי הם תהליכים בדידים. זרם חשמלי הוא תנועה של אלקטרונים, ולכן הוא מקוונטט. גם כאשר יש מספר ממוצע של אלקטרונים בכל שניה, יש תנודות (פלקטואציות) במספר האלקטרונים, מה שיכול להוות גורם לרעש. כמו כן, כאשר פוגע פוטון בגלאי נוצר זוג אלקטרון-חור שיוצר דופק זרם קצר. הזרם בגלאי, זרם האות הוא ממוצע של דופקי הזרמים האלו. אם כך יש לזרם האות אופי בדיד, ואם הערך הממוצע שמודד הגלאי הוא I , בזרם האמיתי יהיו תנודות מעל ומתחת ל I .

רעש אופטי יכול להיווצר מכמה גורמים: רעש שנוצר מאפנון אקראי של עוצמת לייזר, רעש בהרות ($speckle\ noise$), שנובע מהתאבכויות בין מודים בסיבים רב אופניים וגם אור רקע שנופל על הגלאי יכול לגרום לרעש אופטי.

קצב השגיאות:

קצב השגיאות ($bit\ error\ rate, BER$) מוגדר כהסתברות להתרחשות שגיאה. לדוגמה BER של 10^{-9} משמעותו הסתברות של 10^{-9} לשגיאה בכל גילוי או שגילוי אחד מתוך 10^9 גילויים יהיה שגוי. הקשר בין יחס האות לרעש לקצב השגיאות נתון בגרף הבא:



איור 24: הקשר בין יחס האות לרעש לקצב השגיאות

מהדרים

האות מעוות בגלל התרחבותו ונחלש בגלל ההפסדים בתוך הסיב. תפקידו של המהדר (*repeater*) הוא להחזיר למצבו המקורי אור שנחלש או עוות במהלך התקדמותו בסיב ולשוב ולשדר אותו. הוספת מהדר שקולה למעשה להקטנת אורך הסיב. המהדרים בנויים כיחידה עצמאית הנמצאת במארז הגנה, כך שהם יוכלו לפעול גם במקומות מרוחקים שאין גישה קלה אליהם. לדוגמא מערכת הסיבים האופטיים הטרנסאטלנטית מכילה מהדרים מתחת לפני המים. הם מתוכננים ברמת אמינות גבוהה כך שלא יהיה צורך לתקן או להחליף אותם לאורך שנים. בעבר השתמשו בעיקר במגברים אלקטרומוגנטיים, בהם המהדר מורכב ממקלט ומשדר דומים לאלה שמשמשים בהם לשידור וקליטת האות. חלק מהמהדרים כוללים מעגלי גילוי שגיאות המאפשרים לתקן שגיאות שנוצרו באות במהלך התפשטותו בסיב. כיום מקובל יותר להשתמש במגברים אופטיים. מגברים אופטיים בנויים מחומרים בהם רמות האנרגיה מתאימות לפליטה של אורכי גל בהם משתמשים בסיבים, הנפוץ ביותר הוא מגבר ארביום. רמות האנרגיה של יוני הארביום Er^{+3} מתאימות בדיוק לפליטה של אורך גל $1.55\mu m$, כך שכאשר מגיע אליהם אור הוא מעורר אותם והם יורדים רמה תוך פליטת פוטונים. היתרון של מגבר כזה על פני מגבר חשמלי הוא שאין צורך להפוך את האות לחשמלי, להגביר אותו ואז להפוך בחזרה לאופטי אלא יוני הארביום קולטים את האות האופטי ופולטים אותו באורך הגל המתאים בדיוק. התחזוקה של מגבר כזה פשוטה הרבה יותר וכן תפעולו, ולכן השימוש הנרחב בו.

נספח להעשרה - אופטיקה לא ליניארית - סוליטון



איור 25: שחזור התצפית של ראסל (Russell) מאמצע המאה ה-19 בתעלת מים צרה בסקוטלנד. גל המים הבודד הנע בקדמת הסירה הוא הסוליטון. אילו התפשטות הגלים במים הייתה ליניארית, הייתה חבילת הגלים מתרחבת ומאבדת את צורתה במהירות. בניסוי זה חבילת הגלים התנתקה מהסירה והפכה לישות נפרדת אשר שמרה על צורתה. (מתוך <http://www.ma.hw.ac.uk/solitons/soliton1b.html>).

סוליטונים (Solitons) הם חבילות גלים הלכודות על ידי עצמן, אשר אינן מתרחבות בעת התפשטותן. סוליטונים מתקיימים על ידי איזון בין הנפיצה אשר נוטה להרחיב את חבילת הגלים ובין האפקטים הלא-ליניאריים המנסים לצמצם אותה. דרך האפקטים הלא-ליניאריים חבילת הגלים יוצרת בור פוטנציאל ובו-זמנית לוכדת את עצמה בתוכו, ונסביר על כך להלן. הסוליטונים מתפשטים ומגיבים זה עם זה תוך הצגת תכונות של חלקיקים (שגב, פיסיקה פלוס).

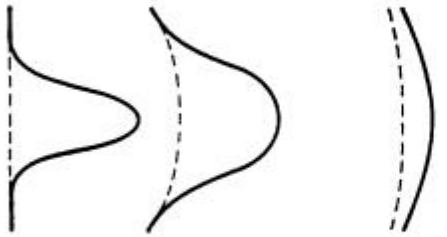
מבוא

לפני למעלה מ-150 שנים, בעת שביצע ניסויים למציאת המבנה היעיל ביותר לסירה השטה בתעלה, גילה מהנדס סקוטי צעיר ג'ון סקוט ראסל (J. S. Russell, 1808-1882) תגלית מדעית מפתיעה. הוא הבחין ב"ערמה עגולה וחלקה של מים, בעלת קצוות ברורים" אשר התקדמה בתעלה צרה ורדודה "ללא שינוי בצורתה או במהירותה". המים היו שלווים משני הצדדים של ה"גל" הבלתי-רגיל הזה, כך שראסל כינה אותו "התרוממות יחידנית" (solitary elevation). ראסל רדף בעקבות ערמת המים, דוהר על גב סוס, לאורך כשלושה קילומטרים עד אשר הגל הבודד חמק ממנו בפיתולי התעלה, עדיין מתמיד במהירותו וללא שינוי בצורתו. חמישים שנה לאחר מכן שני חוקרים הולנדיים, קורטווג (Korteweg) ודה-ורייס (de-Vries), הבינו כי תופעה זו תתכן רק אם ההפרעה היא בעלת משרעת גדולה מספיק, ורק במידה והמערכת מגיבה באופן שונה לגלים בעלי משרעת שונה, כלומר, התנהגות המים בתעלה הרדודה אינה ליניארית. הרבה שנים אחר כך, בשנת 1965 זבוסקי (Zabusky) וקראסקל (Kruskal) הבינו כי חבילות גלים מיוחדות אלו שומרות על זהותן אפילו כאשר הן מתנגשות האחת עם השנייה, תוך שימור אנרגיה ותנע קווי. מסקנתם הייתה כי חבילות גל אלו מתנהגות כמו חלקיקים אשר מכאן והלאה כונו בשם "סוליטונים" (Solitons). בהסבר להלן נרחיב על סוליטונים מרחביים, אך נזכור כי בתקשורת אופטית השימוש העיקרי הוא בסוליטוני-זמן אופטיים.

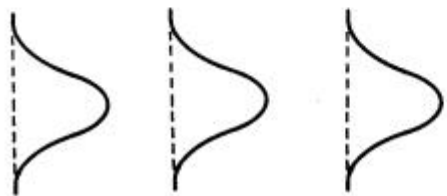
נטייתם הטבעית של חבילות גלים בעת התקדמות בתווך ליניארי היא להתרחב, כפי שהרחבנו לעיל. באופטיקה חבילת גלים התחומה במרחב (אלומת אור צרה) או התחומה בזמן (פולס קצר) תתרחב בדרך כלל.



Self-Focusing



Diffraction



Self-Trapping (Soliton)

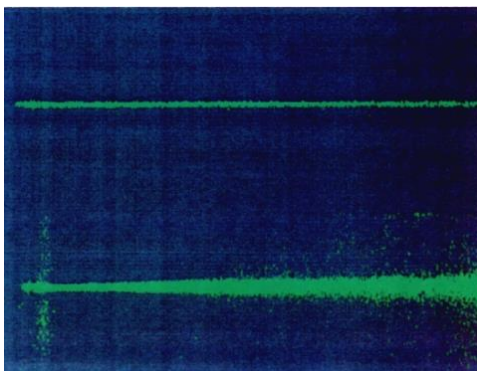
התרחבות חבילת הגל יכולה להימנע על ידי אי-ליניאריות, כלומר, כאשר תכונות התווך משתנות כתוצאה מנוכחות הגל. האפקט הלא-ליניארי יכול למנוע את הצטברות הפרש המופע בין רכיבי חבילת הגלים ובכך לאפשר התפשטות ללא נפיצה. כך, כאשר נוכחות האור משנה את מקדם השבירה של התווך, יכולה התופעה למנוע את הנפיצה ו/או להתבדרות המרחבית על ידי "מיקוד בהשראת אור" (*light-induced lensing*). אם נוכחות אור מגדילה את מקדם השבירה, התפלגות עצמת האור על פני חתך האלומה תוביל להתפלגות מקדם השבירה אשר תתפקד כמו עדשה מרכזת - במרכז האלומה יהיה מקדם גבוה יותר מאשר בשוליה. זהו

"מיקוד עצמי" (*self-focusing*), החיוני ליצירת סוליטון. כאשר המיקוד העצמי מקוזז

במדויק את התבדרות האלומה, האלומה "נלכדת על ידי עצמה" (*self-trapped*) ומתקדמת תוך שמירה על רוחב צר קבוע וזהו סוליטון אופטי מרחבי (*optical spatial soliton*).

בתמונה מס' 27 ניתן לראות סוליטון שכזה המתקדם בגביש אופטי לא-ליניארי. העיקרון המשותף לכל הסוליטונים באשר הם הוא שחבילת הגלים (אלומה או פולס) יוצרת, באמצעות אי-הליניאריות, בור פוטנציאל ולוכדת את עצמה בתוכו. עבור סוליטונים אופטיים מרחביים, אלומת האור הצרה משרה בחומר מנחה-גלים המנחה את הגל שייצר אותו, כלומר יוצרת לעצמה סיב

אופטי בו היא מתקדמת. על ידי כך אלומת האור נשארת צרה ומהווה סוליטון מרחבי.



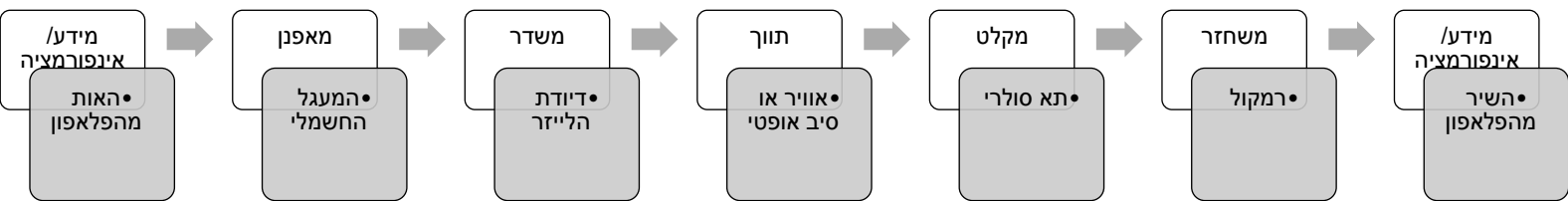
איור 27 : למעלה - צילום של סוליטון מרחבי ברוחב של $10\mu\text{m}$ המתקדם בגביש אופטי לא-ליניארי. למטה - לשם השוואה התבדרות הטבעית של אותה האלומה כאשר האי-ליניאריות "כובתה". אלומת האור מתקדמת משמאל לימין.

פולסי אור קצרים, תחומים בזמן, אשר אינם משנים את צורתם במהלך התפשטותם נקראים "סוליטוני-זמן אופטיים" (*optical temporal solitons*). הם נחזו על ידי א. הסגוה ופ. טאפרט (*F. Tappert & A. Hasegawa*) ב-1973 ונצפו לראשונה על ידי ל. מולנהאוור, ר. סטולן וג'. גורדון (*L. Mollenhaur, R. J. Gordon & Stolen*) ב-1980.

החלק המעשי

המטרה שלנו הייתה פיתוח יחידת הוראה לתלמידים המבוססת על הדגמה של תקשורת אופטית ולשם כך בנינו מערכת פשוטה שמדגימה תקשורת כזו. נדון בפרק זה על חלקי המערכת, האפיון שלה וההתנסות המעשית שלנו בהעברת האור דרך סיב.

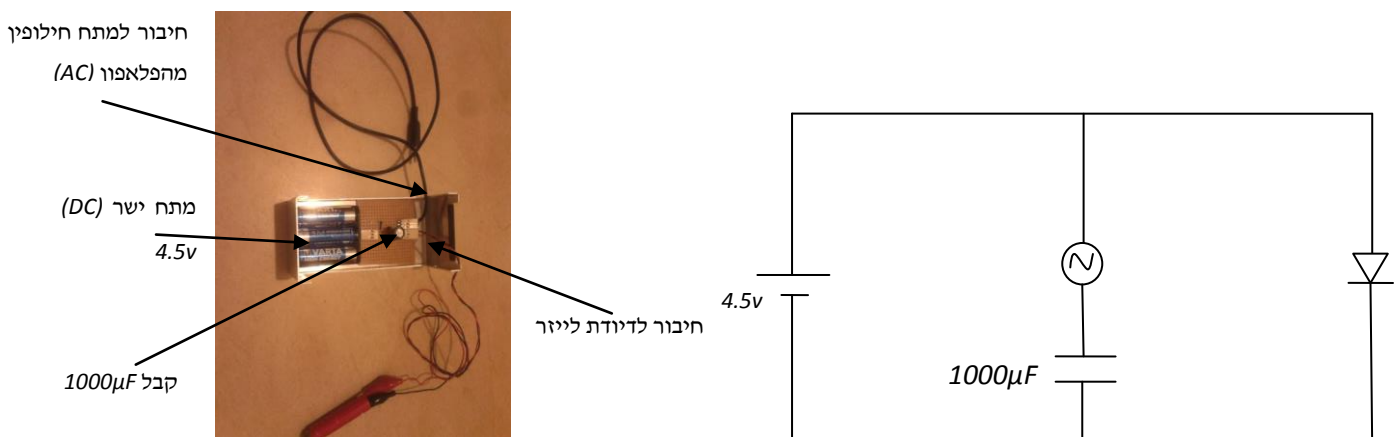
חלקי המערכת: ציין לייזר (פוינטר) ללא בטריות, מעגל חשמלי הכולל בטריות, קבל וכבל תקשורת (המתחבר לפלאפון), תא סולרי ורמקול. במערכת מתקיימת צורה פשוטה מאוד של אפנון AM. גלי הקול מומרים במכשיר הפלאפון למתח חשמלי. המתח החשמלי נופל על דיודת הלייזר כך שעוצמת האור שלה משתנה לפי האות. הלוח הסולרי קולט אור בעוצמה משתנה וממיר אותו למתח שמתנה. הרמקול ממיר בחזרה את המתח לגלי קול. להלן נפרט על חלקי המערכת השונים, אופן פעולתם והשימוש שעשינו בכל חלק. בצורה סכמטית אפשר לתאר כך את המערכת:



איור 28: תרשים מלבנים של מערכת תקשורת אופטית

שלב א- בניית המערכת ואפיון המעגל החשמלי

הלייזר פועל עם מתח של 4.5v, שמסופק לו על ידי 3 בטריות (זרם ישיר DC, Direct Current). כמו כן, כבל התקשורת מספק מתח משתנה (זרם חילופין AC, Alternating Current) בעוצמה של בין 100mv ל-400mv. המעגל החשמלי בנוי בצורה זו:

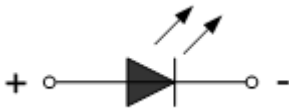


איור 29: המעגל החשמלי - שרטוט וצילום

רכיבי המערכת:

דיודה פולטת אור *LED - light emitting diode*

דיודה שעל ידי הזרמת זרם קדמי בה אפשר להפיק ממנה אור לא קוהרנטי בספקטרום צר.



הדיודה פולטת האור, מורכבת מחומר מוליך למחצה, לרוב מגאליום-

ארסניד. החומר ממנו מורכב המוליך למחצה הוא הקובע את ספקטרום

האור. הסימול של דיודה פולטת אור (אורט - אלקטרואופטיקה):

יתרונותיה של הדיודה פולטת האור:

- א. גודל פיסי קטן – סדר גודל במילימטרים
- ב. צבע אור מוגדר – כל דיודה פולטת אור בספקטרום צר של אורכי גל
- ג. נצילות גבוהה – ההספק הנדרש להפעלתה נמוך מאוד (מילי ואטים).
- ד. הזמן הדרוש להביא את ה- *LED* להארה יכול להגיע למיקרו שניות, לכן אפשר להשתמש בו כמקור של פולסי אור לשימושים שונים (ויקיפדיה, 2013).

הקבל ומקור מתח החילופין:

תפקיד הקבל במעגל הוא לשמור על מקור מתח החילופין - הפלאפון. מכשיר הפלאפון לא בנוי לקבל מתחים גדולים מידי, סוללת הפלאפון היא במתח של 3.7v בלבד. הקבל יוצר למעשה נתק בענף של זרם החילופין, כך שהמתח של 4.5v לא עובר דרך הפלאפון אלא נופל כולו על הקבל. נשים לב שאמנם הקבל יוצר נתק בענף שלו, אבל המטען עליו מתנדנד כמו זרם החילופין וכך האות עובר. בהתאם, המתח שמקבלת דיודת הלייזר הוא חיבור של המתח הישר והחילופין, כלומר מתנדנד סביב 4.5v, לפי האות שמתקבל מהפלאפון. נציין כי עוצמת המתח שמגיע מהפלאפון אינה מספיק גדולה כדי להפעיל את הלייזר וחיבים לספק לו מתח של כ 4.5v. המעגל כפי שהוא בנוי יוצר מצב בו זרם AC "רוכב" על זרם DC. עוצמת האור שפולט הלייזר נמצא ביחס ישר למתח שהוא מקבל ולכן עוצמת האור משתנה גם היא לפי האות החשמלי.

לוח סולרי - תא פוטו וולטאי, המחובר לרמקול:

את האור הנפלט מהלייזר קולטים בעזרת לוח סולרי, לוח הממיר אור למתח חשמלי. תא פוטו



וולטאי הוא סוג של דיודה שמייצרת זרם חשמלי כאשר פוגע בה אור. כתוצאה מבליעת פוטון באטום מתרחש מעבר של אלקטרון מפס הערכיות לפס ההולכה. המשמעות היא שנוצר זוג של אלקטרון חופשי וחור, אותם ניתן להניע על ידי הפעלת מתח (האוניברסיטה הפתוחה, 1997).

במקרה הפשוט ביותר, הדיודה מורכבת משתי שכבות של מוליכים למחצה, לדוגמה, שתי שכבות של סיליקון מאולח. שכבה אחת

מכילה אילוח מסוג *n* (חומר שנוטה לתת את האלקטרונים העודפים איור 30: לוח סולרי - תא פוטו וולטאי, המחובר לרמקול

שלו) והשכבה השנייה מכילה אילוח מסוג *p* (חומר שנוטה לקחת אלקטרונים מאטומים אחרים).

חיבור מוליך למחצה מסוג *n* ומסוג *p* יוצר צומת *PN*, שבו שדה חשמלי בין האזורים שעזבו

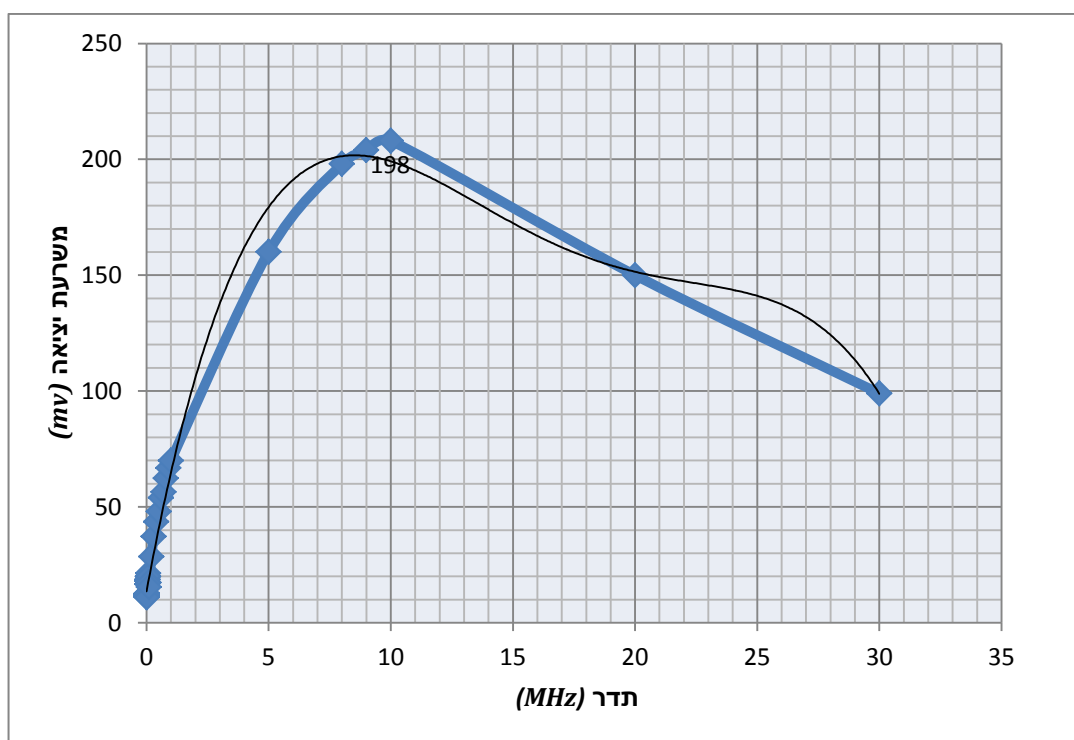
האלקטרוניס ובאזורים שהתמלאו בהם החורים. שדה זה מהווה את המפתח לפעולת התא הסולארי.

כאשר פוטון בעל אנרגיה מספקת פוגע באזור השדה, הוא מנתק אלקטרון מאטום הסיליקון, ויוצר זוג של אלקטרון חופשי וחור. השדה החשמלי מפריד בין האלקטרון לחור ומביא את האלקטרון לצד N ואת החור לצד P . כך נוצר זרם של אלקטרון אחד. פוטונים רבים יצרו זרם רב של אלקטרוניס, כלומר זרם חשמלי (ויקיפדיה, 2013).

עוצמת האור שמקבל הלוח הסולרי משתנה בהתאם לאות החשמלי שהתקבל ממקור מתח החילופין וכך עוצמת הזרם משתנה גם היא לפי האות. הלוח הסולרי מחובר לרמקול, הממיר את הזרם החשמלי בחזרה לגלי קול ומשמיע לנו את האות מהפלפון.

אפיון המעגל כמסנן מעביר גבוהים (*High Pass Filter, HPT*):

תחילה אפיינו את המעגל החשמלי. מכיוון שזהו מעגל הכולל קבל ונגד, ציפינו לקבל סינון של תדרים גבוהים או נמוכים (*high-pass filter* או *low-pass filter*). בדקנו את ההנחתה של האות העובר במעגל החשמלי כפונקציה של התדר אותו הכנסנו למערכת. חיברנו את הכבל של מתח החילופין למחולל תדרים, ובדקנו בעזרת אוסצילוסקופ מהו האות המתקבל בדיודת הלייזר ומה עוצמתו. שינינו את התדרים בטווח של כמה הרצים בודדים עד למגה-הרץ. התוצאות מרוכזות בגרף הבא, כאשר משרעת הגל הנכנס היא 400mv :



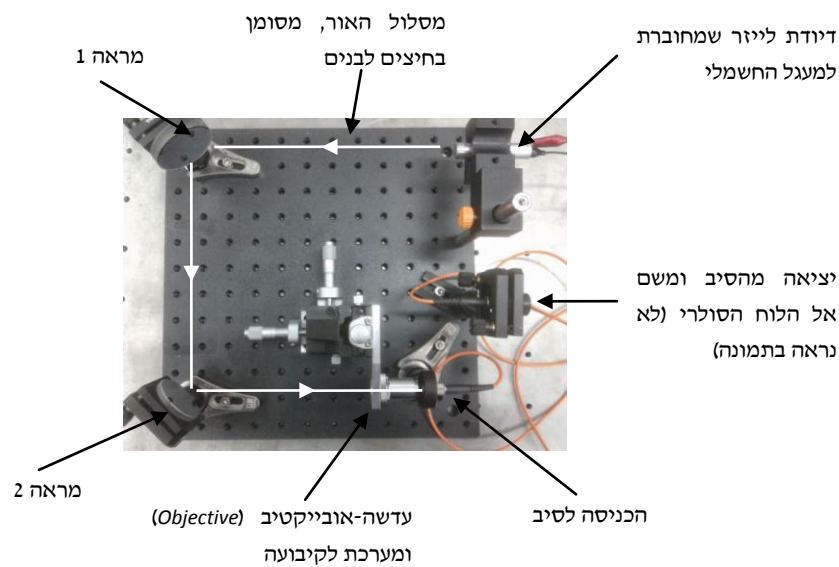
איור 31: ההנחתה של האות העובר במעגל החשמלי כפונקציה של התדר אותו הכנסנו למערכת, כאשר אמפליטודת הגל הנכנס היא 400mv .

חשוב לציין כי היה קושי למדוד בצורה מדויקת כתוצאה מרעשים. על אף הקושי בדקנו בכל מדידה שהתדירות הנכנסת היא גם התדירות היוצאת.

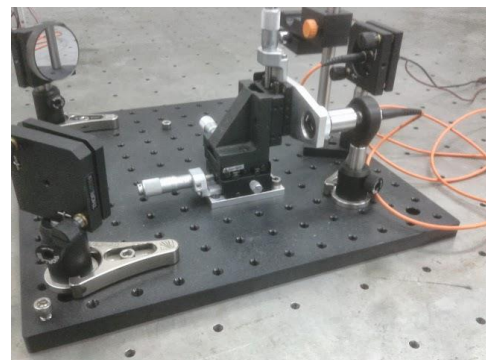
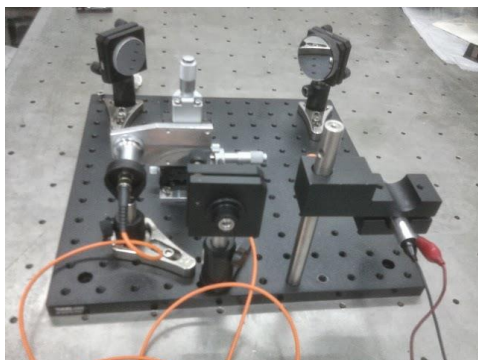
מהתוצאות רואים כי המעגל מנחית את עוצמת האות בצורה משמעותית מאוד, מ 400mv לסביבות 12mv בתחום תדרי השמע ($20\text{Hz}-20\text{KHz}$). בתדרים גבוהים יותר המעגל העביר מצוין, ובסביבות 8MHz ההנחתה היא רק בחצי. זהו למעשה מעגל מסנן מעביר גבוהים. ניסינו למדוד את עוצמת האות המתקבל בתא הסולרי, אך האות כבר היה כל כך נמוך, שאפילו לא הצלחנו למדוד אותו.

שלב ב- הכנסת אור לסיב

ישנן כמה שיטות להכניס אור לסיב, אנחנו השתמשנו ב-2 מראות ועדשה (*Objective*): כדי לכוון את האור לתוך הסיב צריך לשנות 5 דרגות חופש. כל מראה נותנת 2 דרגות חופש, בהטיה שלה לשני כיוונים אפשריים. כמו כן שינינו את המרחק בין הסיב לעדשה עד שהצלחנו לראות את האור בצד השני של הסיב. כדי להיות בטוחים שהכנסנו את האור בצורה אופטימלית השתמשנו בלייזר נוסף אותו הכנסנו לצד השני של הסיב וכיוונו את המערכת כך שכתם האור שהלייזר השני יוצר יתלכד עם הלייזר הראשון. לא נדרשת דרגת חופש נוספת כי הסיב סימטרי לסיבובים סביב עצמו.



מזוויות נוספות:



איור 32: הכנסת האור לסיב בעזרת 2 מראות ועדשה, שנותנת ביחד 5 דרגות חופש.

עבדנו בתחילה עם סיב חד אופן, שמעביר רק כמה אופנים בודדים. ראינו כיצד כאשר מכופפים את הסיב בורח ממנו אור. הסיבה לכך היא כי כשמכופפים את הסיב חלק מהאור פוגע בזווית קטנה מהזווית הקריטית ואז הוא לא יחזור בהחזרה פנימית מלאה אלא יצא דרך דופן הסיב. כמו כן ראינו שכתם האור שהתקבל ביציאת הסיב היה בצורות שונות עבור כיפופים שונים של הסיב. למעשה בכל צורת כיפוף חלק מהאופנים בורחים מהסיב וחלק מהם נשארים (או רק אופן אחד) וכך ביציאת הסיב ניתן לראות אופן מסוים או התאבכות של כמה אופנים כפי שניתן לראות באיור:



איור 33: כתמי האור שהתקבלו עבור כיפופים שונים של הסיב. צורת הכתם מעידה על אופן התנודה שיצא מהסיב.

לאחר הכנסת האור לסיב חד אופן ניסינו לחבר את הלייזר גם לאות מהפלאפון ולנסות לשדר אותו דרך הסיב. התברר כי הצימוד של מקור האור לסיב חד אופן גורם להפסדים כל כך גדולים עד כי לא היה ניתן לשמוע בכלל את האות (השיר). מסיבה זו החלפנו את הסיב חד אופן לסיב רב אופני והעברנו דרכו את האות. בסיב זה הצלחנו לשמוע את האות, אבל העוצמה הייתה חלשה ביותר והרעש היה משמעותי (יחס אות לרעש היה קרוב ל 1). בהתנסות המעשית למדנו עד כמה קשה להכניס אור לסיב חד אופן, וראינו בעינינו את ההבדלים בין סיבים חד אופניים לרב אופניים. כמו כן התברר לנו כי לא יהיה ניתן להביא לכיתות הלימוד את המערכת שכוללת את הסיבים. על כל פנים ההתנסות הייתה עבורנו חוויה משמעותית.

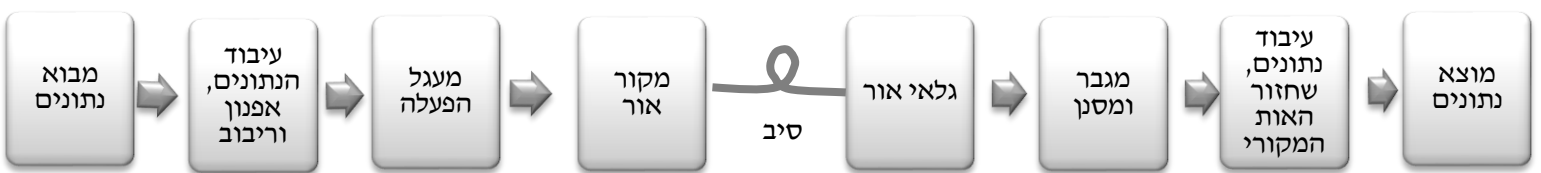
יחידת הוראה

מבוא

הרציונל שעמד מאחורי פיתוח יחידת ההוראה מכיל מספר היבטים. הראשון הוא הרצון לחשוף את התלמיד לחומרים שאינם בתחום מסגרת הלימוד אלא באים להעשיר את הידע שלו, מתוך אמונה שחשיפה לחומרים מעניינים תגרור סקרנות ורצון להתעמק ולהתחבר לתחום הפיסיקה. היבט נוסף הוא קישור בין "עולם הילד" לעולם הלמידה. כיום תלמידים חשופים ומשתמשים באופן תדיר בטכנולוגיה, במיוחד בתחום החברתי והבין-אישי. אם נוכל לכוון ולייעל את השימוש שלהם בתוכנות שיתוף לכיוון של למידה שיתופית הרי שנגרום לכלי טכנולוגי שהוא בעל עוצמה גדולה, ותופס חלק נכבד מזמן התלמיד, להיות לכלי משרת למידה. רעיון זה עלה בעקבות קורס של שילוב טכנולוגיה בהוראה, בו קיבלנו כלים בעזרתם יכולנו לשלב בין נושאים דידיקטיים לכלים טכנולוגיים.

רקע למורה

תקשורת בעזרת סיבים אופטיים מביאה לידי ביטוי שני תחומי ידע, פיזיקה של סיבים אופטיים וטכנולוגיה של מערכות תקשורת. ככלל ניתן לתאר מערכת תקשורת אופטית בעזרת התרשים:

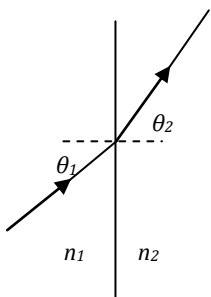


איור 34: תרשים מלבנים המתאר מערכת תקשורת אופטית.

נסקור כאן את שני התחומים, תוך דגש על השילוב ביניהם.

סיבים אופטיים

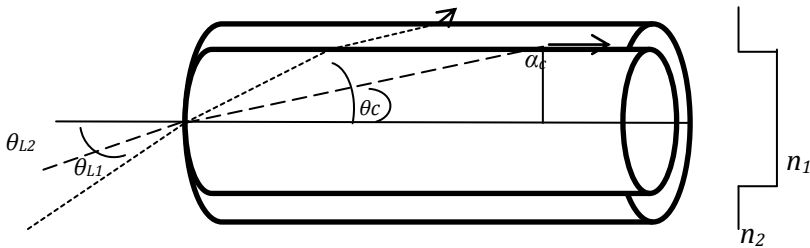
המבנה הפשוט ביותר של סיב אופטי הוא ליבה (*core*) גלילית בעלת מקדם שבירה מסוים המוקפת במעטה (*cladding*) בעל מקדם שבירה נמוך יותר. ניתן לתאר את התפשטות האור בסיב אופטי בעזרת תרשימי קרניים המבוססים על אופטיקה גיאומטרית. התיאור של אופטיקה גיאומטרית טוב כאשר רדיוס הליבה גדול הרבה יותר מאשר אורך הגל λ של האור העובר בו. כאשר אורך הגל ורדיוס הליבה הם באותו סדר גודל, הכרחי לתאר את האור כגל המתפשט לפי משוואות מקסוול, עליהן לא נרחיב כאן. הצורה הפשוטה ביותר של סיב אופטי היא ליבה בעלת מקדם שבירה מסוים ומעטפת בעלת מקדם שבירה אחר. סיב כזו נקרא סיב מדרגה, מכיוון שמקדם השבירה משתנה בקפיצת מדרגה. בצורה אחרת של סיב מקדם השבירה של הליבה משתנה בהדרגה ועולה ככל שנכנסים למרכז הליבה. נמקד את הדיון כאן בסיבי מדרגה בלבד.



איור 35: כאשר אור עובר מתווך בעל מקדם שבירה אחד לתווך בעל מקדם שבירה שונה כיוון האור משתנה לפי חוק סנל

כאשר אור עובר מתווך בעל מקדם שבירה אחד לתווך בעל מקדם שבירה שונה כיוון האור משתנה לפי חוק סנל:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



באיור הבא מתואר סיב טיפוס, דרכו עוברות שתי קרניים הפוגעות בליבה בזוויות שונות. קרן ראשונה: בכניסה אל הסיב

איור 36: סיב טיפוס, דרכו עוברות שני קרניים הפוגעות בליבה בזוויות שונות. קרן אחת ממשיכה בסיב והשניה נשברת ויוצאת ממנו.

מתרחשת שבירה בין האוויר לליבה והקרן ממשיכה בזווית קטנה יותר, פוגעת בשכבה החיצונית, מתרחשת שבירה נוספת והקרן מגיעה למעטה הסיב החיצוני שם היא נשברת ויוצאת ממנו.

קרן שנייה: מתרחשת שבירה בכניסה לסיב, ובהגיעה למעטה השכבה הפנימית הקרן נשברת בזווית של 90° ולמעשה לא יוצאת מהסיב. זווית הפגיעה במעטה נקראת הזווית הקריטית α_c , וקרן הפוגעת במעטה בזווית גדולה מזווית זו תתקדם בתוך הסיב. על פי חוק סנל ניתן לחשב את הזווית

$$\alpha_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad \text{הקריטית:}$$

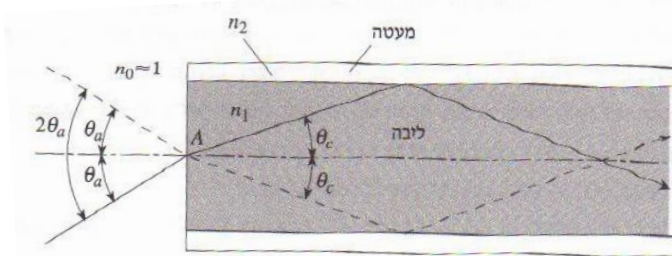
כיוון הקרן שמכתיב את הזווית הקריטית יוצר זווית θ_c עם הציר המרכזי של הסיב. קרניים הפוגעות בליבת הסיב בזוויות גדולות מ θ_c לא יתקדמו בו. זווית זו נקראת **זווית ההתפשטות**

$$\cos \theta_c = \sin \alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{הקריטית ומשקולים גיאומטריים:}$$

זוויות הפגיעה של הקרניים שיכולות לעבור בסיב נמצאות בתחום $0 < \theta < \theta_c$, אך רק חלק מהן יכולות גם להעביר אנרגיה. לכל זווית כניסה של קרן שיכולה להעביר אנרגיה מתאים אופן התפשטות (*propagation mode*), כאשר את הזוויות הללו ניתן לחשב בעזרת משוואות מקסוול

אך הדיון בהן חורג ממסגרת זו. המספר הכולל של אופני ההתפשטות גדל ככל ש θ_c גדלה.

זווית ההתקדמות בסיב חייבת להיות קטנה או שווה לזווית הקריטית $\theta \leq \theta_c$ ועל מנת שתנאי זה ישמר תחום הזווית של אלומת האור הנכנס אל הסיב חייב להיות צר מספיק. לכל סיב ניתן להגדיר חרוט שיוצרות קרני האור הנכנסות דרכו, כאשר זווית הכניסה לסיב $2\theta_a$, כלומר



איור 37: קרני האור מגיעות לסיב בזוויות שונות, ולכל סיב ניתן להגדיר חרוט שיוצרות קרני האור הנכנסות דרכו. את זווית הראש של החרוט ניתן לחשב על פי חוק סנל, ובעזרתה מוגדר המפתח הנומרי.

זווית הראש של חרוט הכניסה מוגבלת על ידי θ_c . על מנת למצוא את הקשר בין הזווית θ_a ובין

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_c} = \frac{n_1}{n_{air}} = n_1 \Rightarrow \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c \quad \text{מקדמי השבירה של הסיב נשתמש בחוק סנל:}$$

הגודל $\sin \theta_a$ נקרא מפתח נומרי *N.A.* (*numerical aperture*) והוא מהווה מדד ליכולת קליטת האור של הסיב. כאשר:

$$N.A. = \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c$$

נבטא את המפתח הנומרי באמצעות מקדמי השבירה של הליבה ושל המעטפת בעזרת שימוש

$$N.A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{ונקבל: } \cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{N.A^2}{2n_1^2} \quad \Delta \text{ : מקדמי השבירה של הפרש היחסי של מקדמי השבירה}$$

$$N.A = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

נציין ונרחיב על כך בהמשך כי מפתח נומרי גדול, קרוב ל 1, פירושו מספר גדול של אופנים שיכולים להעביר מידע בסיב בהתאם למספר גדול יותר של זוויות כניסה אפשריות עבור קרני אור. לעומת זאת מפתח נומרי קטן, קרוב ל 0, פירושו מספר קטן מאוד של קרניים שיוכלו להיכנס לסיב. בסיבים שבשימוש כיום ההפרש היחסי האופייני בין מקדמי השבירה של הליבה והמעטפת, Δ , הוא מסדר גודל של 0.001-0.03.

בהקשר של תקשורת אופטית, חשוב לקחת בחשבון כי כאשר אור עובר בסיב אופטי קיימים שני גורמים שמשפיעים עליו ומעוותים את האור המקורי, והם ניחות ונפיצה.

ניחות בסיב

הניחות בסיב הוא היחס בין עוצמת האור (משרעת הגל) היוצא מהסיב לעוצמת האור הנכנס אליו, כאשר תמיד תהיה הנחתה של העוצמה במעבר האור דרך הסיב. מקובל לחשוב כי אור העובר בסיב לא מאבד מעוצמתו לאורך מרחק רב. אולם בשידורי תקשורת, מכיוון שמדובר על מרחקים גדולים מאוד (לעיתים אלפי קילומטרים ויותר) ועל צורך בדיוק גבוה, גם הנחתה קטנה מאוד הופכת משמעותית.

בתקשורת אופטית כיום משתמשים בעיקר באותות דיגיטליים, דפקים (פולסים) של אור כפי שנרחיב בהמשך. בצורת תקשורת כזו האות המשודר הוא סדרה של דפקי אור, כלומר סדרה של אור/חושך לסירוגין. לדוגמא, סדרה של שלושה דפקים רצופים של אור מסומנת 111, וסדרה של

אור/חושך/אור מסומנת 101. הנחתה

של עוצמת האור העובר דרך הסיב

עלולה לגרום למצב בו משודר אור, אך

עוצמתו יורדת כל כך עד כי הגלאי

הקולט את האור (תא סולרי, לדוגמא)

שאינו מספיק רגיש לא קולט אותו

ודפק של אור מתקבל כחושך. כך

נפגע האות המשודר ואיכות

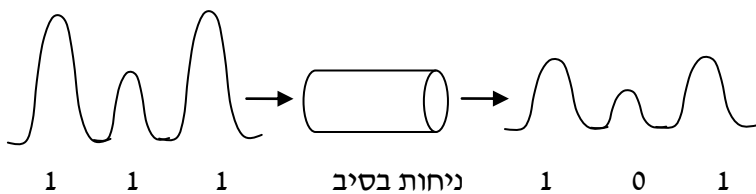
התקשורת נפגמת.

קיימים שלושה גורמים בסיסיים לניחות בסיב: הפסדי בליעה בחומר, פיזור אור והפסדי מנחה

גל- הפסדים הנגרמים בשל פגמים ועיוותים במבנה הסיב ובשל כיפופים (בכיפופים זווית הפגיעה

במעטה הסיב יכולה להיות קטנה מהזווית הקריטית α_c והאור ייצא מהסיב). כל ההפסדים הללו

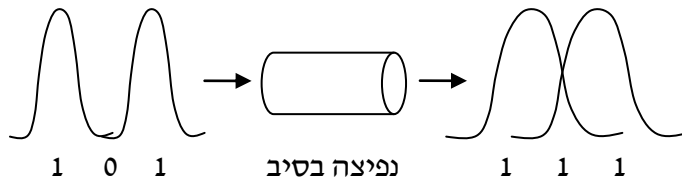
תלויים גם באורך הגל ועל ידי בחירה נכונה שלו ניתן להגיע לצמצום מירבי שלהם.



איור 38: הנחתה של עוצמת האור (משרעת הגל) העובר דרך הסיב עלולה לגרום למצב בו משודר אור, אך עוצמתו יורדת כל כך עד כי הגלאי הקולט את האור מזהה סדרה של אור/אור (111) כסדרה של אור/חושך/אור (101) ונגרם עיוות של האות.

נפיצה (dispersion):

המונח נפיצה מתאר תופעה של התרחבות דופק (פולס) האור במהלך התקדמותו בסיב. התרחבות זו נגרמת על ידי סוגים שנים של תופעות נפיצה, נפיצה בין אופנית ונפיצה תוך אופנית, ונרחיב על כך מיד. הנפיצה הכוללת תלויה באורך הסיב וככל שהסיב ארוך יותר הנפיצה גדולה יותר.



בשידור דיגיטלי, בו משדרים דפקים של אור, כל דופק של אור הוא למעשה חיבור של גלים בעלי תדירויות שונות על מנת ליצור אור שממוקד בטווח זמן קצר מאוד. כל

אופן התקדמות של גל, שכאמור לעיל מתאים לזווית כניסה מסוימת לסיב, איור 39: כאשר דפקי אור מתרחבים הם עלולים לחפוף אחד את השני ובאזור החפיפה יתקבל אור במקום חושך. כך סדרת דפקים אור/חושך/אור (101) תתקבל כאור/אור/אור (111) מה שיגרום לעיוות האות ושיבוש בתקשורת.

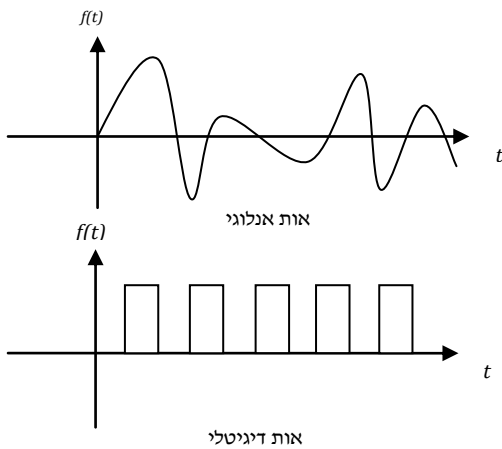
וכל גל בעל תדירות שונה מתקדם במהירות שונה במעט בתוך הסיב. ההשלכה של תופעה זו היא התרחבות של דופק האור. הדופק, שמכונה חבילת הגלים - חיבור של גלים שונים, נכנס לסיב בזמן מסוים כאשר הוא מרוכז מאוד. במעבר דרך הסיב, כאשר כל מרכיב מתקדם במהירות שונה, החבילה מתפרקת, "נמרחת", ולא מגיעה לקצה הסיב באותה צורה בה נכנסה לסיב. ניתן לראות את התופעה בנפיצה הצבעית, כאשר כל גל בתדירות שונה, כלומר כל צבע, מתקדם במהירות אחרת ובזווית אחרת במעבר דרך תווכים שונים ואלומת האור מתרחבת ומתפרקת לרכיביה.

בתקשורת יש דגש על תופעה זו בהיותה הגורם המשמעותי ביותר לעיוות אות משודר. כאמור לעיל, בשידור דיגיטלי הכרחי להבחין בין דפקי האור. כאשר דפקי אור מתרחבים הם עלולים לחפוף אחד את השני ובאזור החפיפה יתקבל אור במקום חושך. כך סדרת דפקים אור/חושך/אור (101) תתקבל כאור/אור/אור (111) מה שיגרום לעיוות האות ושיבוש בתקשורת.

הנפיצה הבין אופנית קשורה באופן ישיר למפתח הנומרי, משום שהוא הקובע את מספר האופנים היכולים לעבור דרך הסיב. מפתח נומרי גדול, כלומר מספר גדול של אופנים שנכנסים לסיב גורם לנפיצה גדולה. נפיצה תוך אופנית קשורה בתחום אורכי הגל אותם משדר מקור האור, כך שמספר גדול יותר של אורכי גל משודרים יגרום לנפיצה גדולה יותר.

עקרונות תקשורת

סוגי אותות



איור 40: סוגי אותות שונים

כדי להעביר מידע משתמשים באות שמשתנה בזמן, אות קבוע בזמן (כמו $\cos(\omega t)$, לדוגמא) אינו מכיל מידע. המידע הוא למעשה השינוי של האות בזמן. רוחב תחום התדרים של האות נקרא רוחב סרט. בכל מערכת תקשורת המידע המועבר יכול להיות אות אנלוגי או דיגיטלי. באות אנלוגי עוצמת האות (הזרם החשמלי או עוצמת האור) משתנה כפונקציה של הזמן. דוגמאות נפוצות הן מיקרופון שממיר קול או מצלמת וידאו שממירה תמונה לאות חשמלי. האות הדיגיטלי, בניגוד לכך, לוקח רק ערכים בידיים ומשדר אותם

במרווחי זמן שונים. דוגמא ידועה לאות דיגיטלי הם נתוני מחשב. ניתן להמיר אות אנלוגי לדיגיטלי והפוך בקלות יחסית. בתקשורת אופטית מקובל כיום להשתמש באות דיגיטלי.

מאפיין השידור האנלוגי הוא עוצמת האות המשתנה בזמן. במערכת אנלוגית אחת המגבלות העיקריות היא הרעש במערכת, שיכול להיות פנימי או חיצוני.

בשידור דיגיטלי משדרים וקולטים דפקים (*pulses*) של אור, שיש להם רק שתי רמות, נמוכה וגבוהה, *on* ו *off* או 1 ו 0, זו צורה בינארית. 2 האפשרויות של הצורה הבינארית מכונות סיביות או ביטים, "ביט 1" (יש זרם/ אור) ו"ביט 0" (אין זרם/ אור). ההשפעה של הרעש מופחתת מאוד מכיוון שהמערכת צריכה להיות מסוגלת להבחין בין שתי רמות בלבד, ובדרך כלל הן נבדלות זו מזו באופן ברור.

רוחב פס בהקשר זה הוא תחום התדרים בהם המערכת יכולה לטפל מבלי לגרום להפסדים גדולים מידי בעוצמת האות.

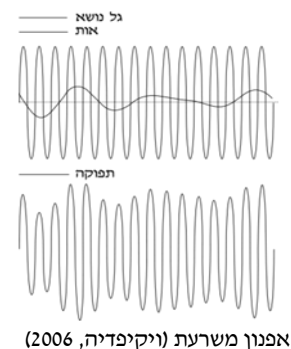
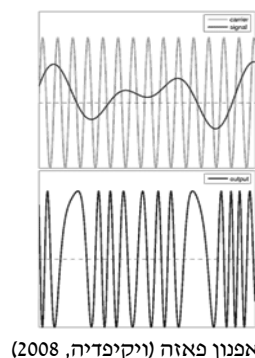
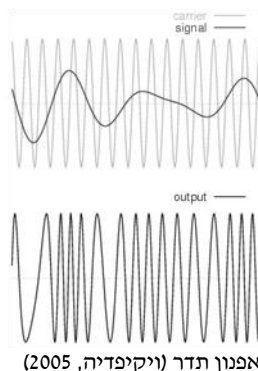
אפנון

במערכות תקשורת מתקדמות (יחסית) לא משדרים את האות עצמו אלא אות מאופנן, בו המידע מורכב על גל נושא, *sin* או *cos*. כך התדר המשודר שונה מהתדר של האות, אבל הוא מכיל את אותו מידע. הגל הנושא במקרה של סיב אופטי הוא האור. קיימות מספר סיבות לאפנון, בניהן:

- הקצאת תדרים לתחנות שידור שונות כדי לשדר מספר אותות במקביל.
- שימוש באנטנה סבירה: אנטנה צריכה להיות בגודל של כמחצית אורך גל, ובתדרי השמע זה סדר גודל של כמה מאות ק"מ. העברה לגל נושא עם תדירות גדולה יותר (סדר גודל של MHz) מאפשר שימוש באנטנה סבירה, של מטרים בודדים.

דרכים לאפנון אות אנלוגי:

אפנון משרעת: צורת אפנון זו מתבססת על שינוי בעוצמתו של הגל הנושא, שינוי במשרעת שלו. אפנון פאזה: באפנון כזה מרכיבים את האות אותו רוצים לשדר בתוך הפאזה של הגל הנושא, כלומר הפאזה של הגל תהיה חיבור של הפאזה המקורית של הגל הנושא עם האות. אפנון תדר: באפנון תדר אנו רוצים שהתדר בכל רגע יהיה מתכווני עם האות המשודר, כלומר האות המשודר הוא כזה שהתדר הרגעי שלו הוא חיבור של התדר הנושא והאות. באפנון אות דיגיטלי משתמשים בשיטות הדומות מאוד לאפנון אות אנלוגי, עם דגשים מיוחדים לאותות בדידים.



איור 41: דרכים לאפנון אות אנלוגי

רעיונות לפעילויות עם תלמידים

א) פעילות הדגמת תקשורת אופטית בעזרת מערכת פשוטה ופלאפון.

מטרות הפעילות: גיוון דרכי ההוראה, קישור בין הפיזיקה לעולמם של התלמידים וחשיפת תלמידים לנושא הנמצא בחזית הפיתוח הטכנולוגי.

הציוד הנדרש: פלאפון (רצוי של אחד התלמידים) ומערכת הכוללת: ציין לייזר (פוינטר) ללא בטריות, מעגל חשמלי שכולל בטריות וכבל תקשורת (המתחבר לפלאפון), תא סולרי ורמקול.

תיאור הפעילות: חיבור כבל תקשורת לפלאפון של אחד התלמידים ושידור האות מהפלאפון (שיר, לדוגמה) למרחק מסוים. כבל התקשורת מחבר בין מכשיר הפלאפון למעגל חשמלי שמחובר לציין לייזר, והוא מאיר לפי האות ולמעשה משדר אותו. את האור מהלייזר קולטים בעזרת תא סולרי שמחובר לרמקול וכך שומעים את השיר (האות) ממרחק. למעשה המערכת מדגימה צורה פשוטה מאוד של אפנון AM.

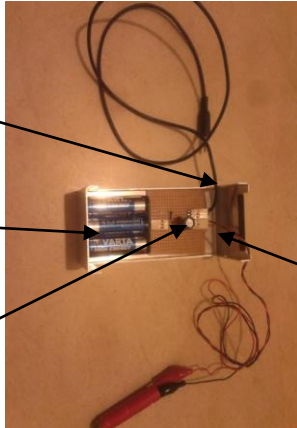
חיבור למתח חילופין

מהפלאפון (AC)

מתח ישר (DC)

4.5v

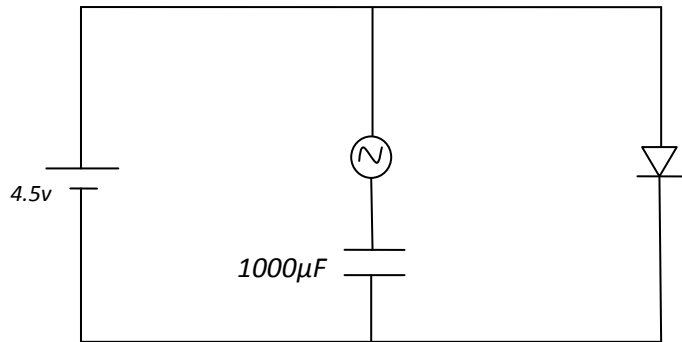
קבל $1000\mu F$



חיבור לדיודת לייזר

4.5v

$1000\mu F$



איור 42: המערכת הכוללת ציין לייזר (פוינטר) ללא בטריות, מעגל חשמלי הכולל בטריות וכבל תקשורת (המתחבר לפלאפון), תא סולרי ורמקול. ניתן לראות גם שרטוט של המעגל החשמלי.

ב) פעילות מעבדה - התנסות בהכנסת אור לסיב.

מטרות הפעילות: התנסות של התלמידים בהכנסת אור ממקורות אור שונים לסיבים מסוגים שונים, הבנת הקושי הכרוך בכך והבחנה בין הסיבים השונים. הפעילות יכולה גם להתאים כפעילות חקר.

הציוד הנדרש: פנסים מסוגים שונים (לייזר בכמה צבעים, פנס לד), סיבים שונים (סיב חד אופני ורב אופני), עדשות בעוצמות שונות (עדשה כמו עדשת מיקרוסקופ המכונה 'אובייקטיב') וציוד קיבוע לכל הציוד לעיל. ניתן לשקול פעילות במעבדה חיצונית לבית הספר.

תיאור הפעילות: התלמידים יתנסו בהכנסת אור ממקורות שונים לסיבים מסוגים שונים. בפעילות זו ניתן לראות את יעילותו של פנס הלייזר על פני פנס הלד ואת השוני הגדול בין סוגי סיבים שונים. כאשר המטרה היא הבנה שלסיב רב אופני קל מאוד להכניס אור, אך הנפיצה בסיב משמעותית מאוד. לסיב חד אופני קשה מאוד להכניס אור, אך הנפיצה בו קטנה הרבה יותר. מהפעילות ניתן ללמוד על התאמת הסיב לסוג התקשורת בו מעוניינים.

ג) פעילות לארגון ידע ויצירת מפת מושגים

מטרות הפעילות: ארגון הידע אותו למד התלמיד בכיתה, הבהרת המושגים הרלוונטים והקשרים בניהם, הפקת מידע (שליפת מושגים) מתוך טקסט.

תיאור הפעילות: הפעילות מחולקת לפעילות אישית ופעילות כיתתית. בפעילות האישית התלמיד יקרא טקסט קצר המתאר את המושגים והקשרים בניהם, יוציא מתוכו מושגים רלוונטים וירשום כל מושג והסבר עליו. לאחר מכן כל תלמיד ירשום כמה שיותר קשרים בין המושגים במילים שלו. בפעילות כיתתית התלמידים יעלו כמה שיותר מושגים ויסבירו אותם (חזרה על החלק האישי ושיתוף המידע בין התלמידים). לאחר מכן ישבצו את המושגים במפת מושגים אילמת בעזרת המורה וכך ירשמו למעשה את הקשרים בניהם.

נציין כי פעילות זו מבוססת על פעילות "על מה מספרת הבעיה" אליה נחשפנו בקורס סוגיות בהוראת פיזיקה של ד"ר חנה ברגר וד"ר אסתר בגנו.

ד) פעילות מבוססת סימולציה על תקשורת דרך סיבים, אותה נביא מפורטת להלן.

פעילות מפורטת – פעילות מבוססת סימולציה על תקשורת דרך סיבים

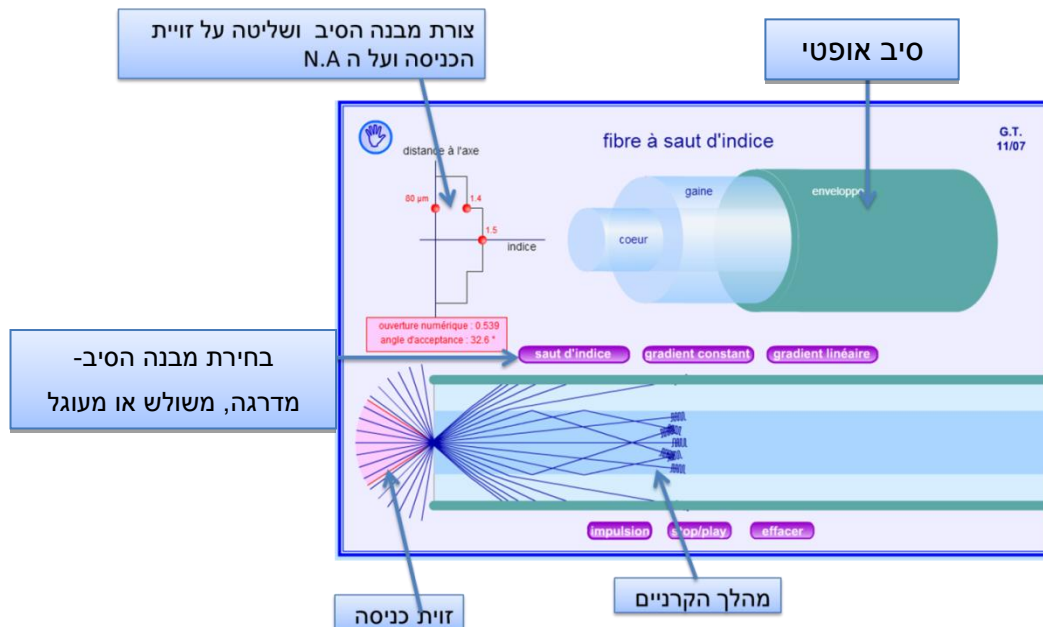
רקע ומטרות הפעילות

תקשורת אופטית דרך סיבים נמצאת כיום בחזית הפיתוח הטכנולוגי, במטרה להגדיל את קצב הנתונים המשודר ולשפר את איכות האות. מטרת פעילות זו היא לחקור בעזרת סימולציה מהם מאפייני הסיב המשפיעים על איכות האות העובר דרכו וכך להבין קצת על תחום חשוב זה. בעזרת הפעילות ניתן להבין מדוע יש רעש בשידור תקשורת ומה יכול להשפיע על איכותו. הסימולציה מקשרת בין הידע שנלמד לטכנולוגיה הנמצאת בשימוש נרחב ומדגישה את הקשר בין פיזיקה לחיי היום-יום.

קישור לסימולציה

<http://www.sciences.univ->

[nantes.fr/sites/genevieve_tullouze/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tullouze/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.html)



הערות דידקטיות

ידע קודם נדרש: הכרת אופטיקה גיאומטרית (מתוך תוכנית הלימודים בכיתה י) ובכללה חוק סנל, החזרה פנימית מלאה וסיבים אופטיים, הכרת המושגים "מפתח נומרי" ו"זווית כניסה" באופן איכותי. מומלץ לבצע פעילות של ארגון ידע כפעילות מקדימה כדי לוודא שכל תלמיד אכן מבין את המושגים והקשרים ביניהם.

התכנים העיקריים שהלומדים ירכשו: התלות של המפתח הנומרי/ זווית הכניסה לסיב בפרמטרים כמו קוטר הסיב ומקדמי השבירה של הסיב בצורה איכותית, והבנת המשמעות של מפתח נומרי/ זווית כניסה כמשפיע על איכות האות המשודר דרכו.

המיומנויות שהלומדים יפתחו: שימוש בסימולציה, הסקת מסקנות מהסימולציה תוך שימוש בידע המקדים הנדרש.

קשיים שהתלמידים עשויים להיתקל בהם: מלבד הקשיים בהם התלמידים נתקלים בלומדם אופטיקה גאומטרית, הם עשויים לתקל בקשיים נוספים. לדוגמה יתכן כי יהיה קשה לתלמידים

להבין מתוך הסימולציה מדוע ריבוי קרניים בסיב גורם דווקא לשיבושים בקליטה ולא לקליטה טובה יותר (כי מגיעות יותר קרניים).

תיאור הפעילות

הפעילות נערכת לפי מודל "נבא-צפה-הסבר" (*Predict-Observe-Explain, POE*). במודל זה התלמיד מנבא תוצאה על פי האינטואיציה, בודק האם השערתו נכונה על ידי ביצוע תצפית/ ניסוי, משווה בין השערתו לתוצאות המתקבלות ולבסוף מסביר את המסקנות הנובעות מהניסוי. במקרה זה התצפית מתבצעת בהפעלת הסימולציה. התלמיד בונה את הידע שלו כאשר הוא נתקל בקונפליקט קוגניטיבי אותו מספקת לו התצפית שיכולה לעמוד בסתירה להשערה הקודמת שלו.

פעילות זו הינה למעשה רצף של פעילויות, המתחיל בעבודה אישית בבית, בה כל לומד יענה בצורה יחידנית על שאלון מקוון, לאחר מכן כל זוג לומדים ידון על השאלון במסמך שיתופי. המפגש לאחר מכן יתקיים בכיתה ובו יהיה דיון כיתתי פרונטלי (לא מקוון) ולבסוף התלמידים יענו על רפלקציה אישית.

הלמידה בצורה כזו, המחולקת לארבעה השלבים יחידני, קבוצתי, כיתתי ורפלקציה אישית, מעלה על פי ניסיוננו את רמת ההבנה של התלמיד ותורמת להבניית הידע בצורה מעמיקה יותר אצל הלומד. נפרט להלן כל חלק.

רצף הפעילויות:

פעילות א'- פעילות אישית ממוקדת סימולציה.

פעילות ב'- פעילות בקבוצות קטנות מבוססת על הפעילות האישית.

פעילות ג'- דיון כיתתי.

פעילות ד'- רפלקציה אישית.

פירוט על כל אחת מהפעילויות:

פעילות א': פעילות אישית ממוקדת סימולציה.

מטרת הפעילות:

בתחום התוכן: המחשה ויזואלית של מעבר קרניים בסיב כתלות בפרמטרים שונים.

בתחום המיומנות: הפקת מידע מסימולציה לטבלה והפקת מידע מטבלה.

אופן הפעלת הלומדים: עבודה אישית בבית מול מחשב.

משך הפעילות: כשעה.

תיאור הפעילות: התלמיד מתנסה בסימולציה ועונה על שאלות מנחות ממוקדות מטרה. ההנחיות לתלמיד נשלחות אליו כמסמך גוגל משותף לו ולמורה בו מופיעים תיאור הפעילות, קישור לסימולציה והסבר עליה ושאלות מנחות. התלמיד עונה את תשובותיו במסמך המשותף.

[קישור לפעילות.](https://docs.google.com/document/d/1NKHG9SX3Rk6j-02nDjMjYnrUsw7b0Jrl-cLTonRxiy5Q/edit)

<https://docs.google.com/document/d/1NKHG9SX3Rk6j-02nDjMjYnrUsw7b0Jrl-cLTonRxiy5Q/edit>

הפעילות מופיעה גם בעמודים הבאים.

פעילות מבוססת סימולציה - סיבים אופטיים

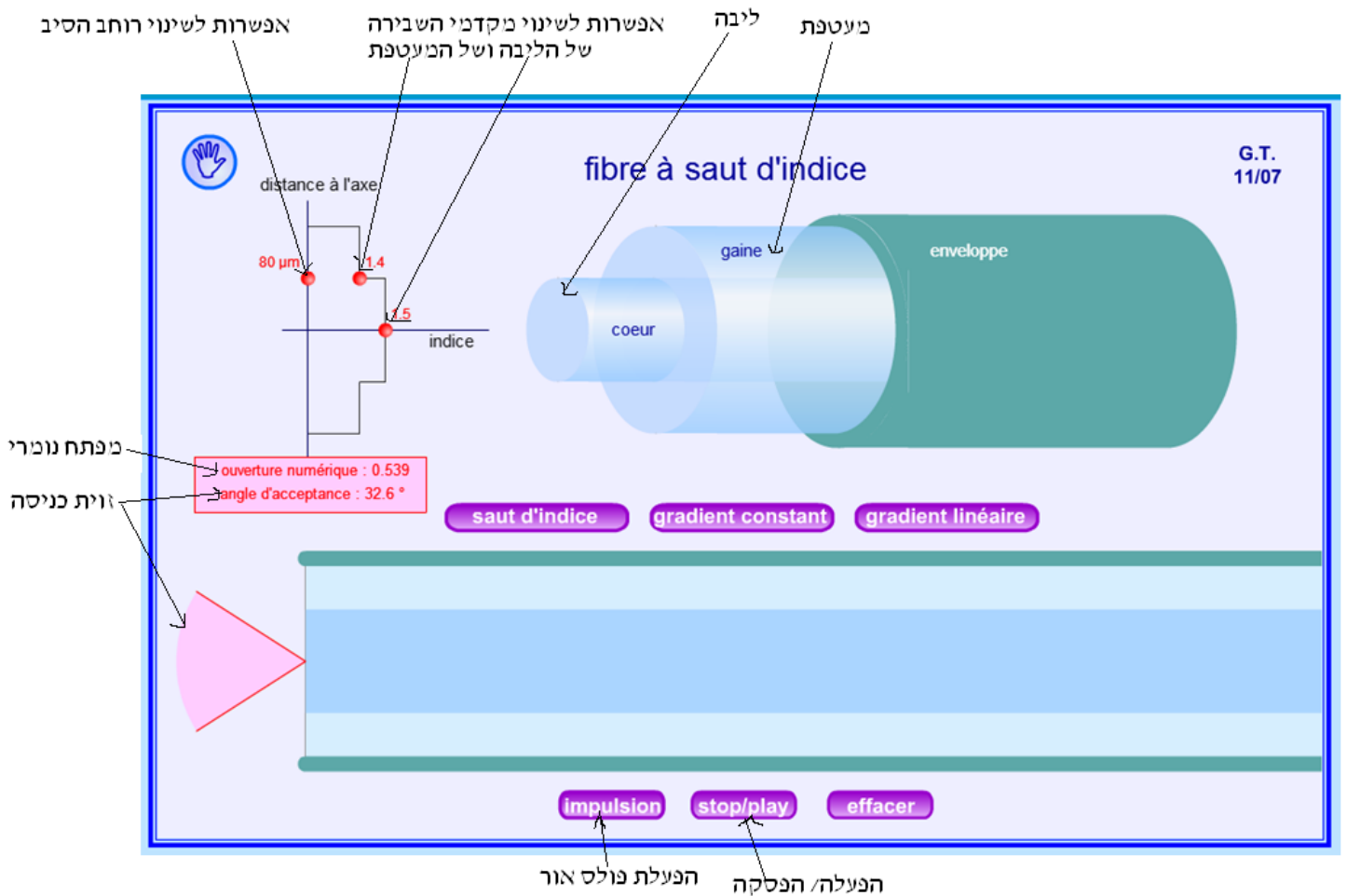
לפני התחלת הפעילות - תזכורת:

קרני האור מגיעות לסיב בזוויות שונות. לכל סיב ניתן להגדיר קונוס כניסה, שכל הקרניים שנמצאות בתוך הקונוס ייכנסו לסיב ויעברו בתוכו מבלי לצאת דרך דופן הסיב. את זווית הראש של החרוט הזה נכנה זווית כניסה. כמו כן ניתן להגדיר "מפתח נומרי", הקשור לזווית הכניסה, ומהווה מדד לכמות קרני האור שיכולות להיכנס לסיב. כאשר הוא קרוב ל 0, יהיו מעט קרניים כאלו, וכאשר הוא קרוב ל 1, יהיו הרבה קרניים שיוכלו להיכנס לסיב.

פתח את הסימולציה בקישור הבא:

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.html

כפי שניתן לראות, אפשר לשנות את מקדם השבירה של הליבה, מקדם השבירה של המעטפת ורוחב הסיב. כמו כן לכל שינוי מחושבת זווית הכניסה האפשרית והמפתח הנומרי, וניתן גם להריץ את הסימולציה ולראות את צורת התפשטות האור בסיב.



בפעילות זאת יש לקבע את סוג הסיב לסיב מדרגה (כפי שמופיע באיור).

שאלה למחשבה:

מה לדעתך ישפיע על זווית הכניסה ועל המפתח הנומרי?

לפניך כמה משימות:

1. קבע את מקדם השבירה הפנימי להיות 1.5 ושנה את מקדם השבירה החיצוני מ 1.3 עד 1.5 בקפיצות של 0.02. רשום בטבלה את הערכים המופיעים במפתח הנומרי ובזווית הכניסה.

$n_1=1.5$

n_2	1.3	1.32	1.34	1.36	1.38	1.4	1.42	1.44	1.46	1.48	1.5
NA											
α											

מה המסקנה שאפשר להסיק מהטבלה לדעתך?

2. קבע את מקדם השבירה החיצוני להיות 1.3 ושנה את מקדם השבירה הפנימי מ 1.3 עד 1.5 בקפיצות של 0.02. רשום בטבלה את הערכים המופיעים במפתח הנומרי ובזווית הכניסה.

$n_2=1.3$

n_1	1.3	1.32	1.34	1.36	1.38	1.4	1.42	1.44	1.46	1.48	1.5
NA											
α											

מה המסקנה שאפשר להסיק מהטבלה לדעתך?

3. כעת קבע את מקדמי השבירה להיות: $n_1=1.35$, $n_2=1.6$ ושנה את רוחב הסיב מ $20\mu m$ עד $120\mu m$ בקפיצות של $20\mu m$. רשום בטבלה את הערכים המופיעים במפתח הנומרי ובזווית הכניסה.

$n_1=1.35$, $n_2=1.6$

רוחב הסיב	20	40	60			120
NA						
α						

מה המסקנה שאפשר להסיק מהטבלה לדעתך?

4. חזור על המשימה הקודמת כאשר מקדמי השבירה שונים: $n_1=1.5$, $n_2=1.51$.

רוחב הסיב	20	40	60			120
NA						
α						

מה המסקנה שאפשר להסיק מהטבלה לדעתך? _____.

כעת, לאחר ביצוע המדידות, נחזור לשאלה הראשונה: מה לדעתך משפיע על זווית הכניסה ועל המפתח הנומרי? האם השערתך היתה נכונה (בתשובה לשאלה למחשבה)? אם כן, הסבר במה עזרה לך הפעילות. אם לא, הסבר מה היתה הטעות שלך, וכיצד הפעילות עזרה לך לתקן את הטעות.

פעילות ב': פעילות בקבוצות קטנות מבוססת על הפעילות האישית מטרת הפעילות:

בתחום התוכן - העמקת ההבנה שנרכשה בפעילות האישית.
 בתחום הרגשי חברתי - יצירת שיח פיזיקלי בין קבוצת לומדים, שיתוף פעולה בין התלמידים.
 אופן הפעלת הלומדים: עבודה בקבוצות קטנות (2-3 תלמידים) מול מחשב.
 משך הפעילות: כחצי שעה.
 תיאור הפעילות: תלמידים ידונו ביניהם ויעלו את מסקנותיהם בכתב בקובץ מקוון.

[קישור לפעילות.](https://docs.google.com/forms/d/1xzU0sgUfieuYL-aGN98K8jkeCb3hb6uJv58n_fphdlU/viewform)

https://docs.google.com/forms/d/1xzU0sgUfieuYL-aGN98K8jkeCb3hb6uJv58n_fphdlU/viewform

הפעילות:



עבודה קבוצתית

* דרוש

שמות התלמידים: *

האם יש שוני בין המסקנות שלכם לטבלה הראשונה?

- כן
לא

כתבו/גבשו מסקנה משותפת

האם יש שוני בין המסקנות שלכם לטבלה השנייה?

- כן
לא

כתבו/גבשו מסקנה משותפת

האם יש שוני בין המסקנות שלכם לטבלה השלישית?

- כן
לא

כתבו/ גבשו מסקנה משותפת

האם יש שוני בין המסקנות שלכם לטבלה הרביעית?

- כן
לא

כתבו / גבשו מסקנה משותפת

הזרה לשאלת האתגר

לאחר הדיון בכם ולאחר שהגעתם להסכמה בתשובותכם מה לדעתכם משפיע על זווית הכניסה ועל המפתח הנומרי?

מה הביטחון שלכם בתשובתכם לשאלת האתגר?

- במידה רבה מאוד
במדה רבה
במדה חלקית
לא בטוח

שלח

לעולם אל תשלח סימנאות באמצעות טפסים ב-Google.

תנוק זה לא נוצר או נתמך על ידי Google.
דווח על שימוש לרעה - תנאי שירות - מונחים נוספים

מופעל על ידי
Google Drive



פעילות ג': דיון כיתתי.

מטרת הפעילות:

בתחום התוכן: התלמיד יעמת את דעתו עם קבוצות נוספות. התלמיד יוכל יצביע על הקשר הנכון בין מעבר קרניים בסיב לפרמטרים השונים.
בתחום רגשי חברתי: יצירת שיח חיובי בכתה ואווירה מכבדת.
אופן הפעלת הלומדים: דיון פרונטלי בכתה.
משך הפעילות: כשעה
תאור הפעילות: דיון בכתה על תשובות התלמידים מהחלק הקבוצתי שבסופו התלמידים יתבקשו לענות על שאלות סיכום על הדיון.

שאלות מנחות לדיון- למורה

- 1) כל קבוצה מתבקשת להציג האם היה שוני בין התשובות שלהם לבין המסקנה המשותפת, כאשר אין חזרה על הנאמר אלא כל קבוצה מוסיפה על קודמיה.
- 2) כל קבוצה מתבקשת להציג את מסקנותיה: מה משפיע על המפתח הנומרי?
- 3) המורה יריץ את הסימולציה בשני מצבים מפתח נומרי גדול ומפתח נומרי קטן. מה ההבדל בין התקדמות האור בסיב בשני המקרים?
- 4) התקדמות אור בסיב בזווית שונות גורמות ל...?
- 5) באיזה מקרה לדעתכם האות יישמר בצורה הטובה ביותר?

סיכום הדיון הכיתתי.

א. תנאי הכרחי שאור יישאר כלוא בסיב הוא כי מקדם השבירה של (הליבה/המעטפת) _____ צריך להיות (גדול/קטן) ממקדם השבירה של (הליבה/המעטפת) _____

ב. על פי מה נקבעים זווית הכניסה והמפתח הנומרי? הסבר: _____

ג. סכם מהו הקשר בין תקשורת לסוג הסיב? _____

פעילות ד': רפלקציה.

מטרת הפעילות: קבלת משוב, התלמיד יבצע רפלקציה על התהליך שעבר והמורה יקבל משוב על הפעילות.

אופן הפעלת הלומדים: עבודה אישית בכתה, מול מחשב.

משך הפעילות: 5-10 דקות.

תאור הפעילות: התלמיד יענה על שאלון רפלקציה מקוון.

[קישור למסמך](https://docs.google.com/document/d/1kugm3qjSrCZJmgnyvv20nDut0Xu2t9gZbfZ_ixAU2Y/edit).

https://docs.google.com/document/d/1kugm3qjSrCZJmgnyvv20nDut0Xu2t9gZbfZ_ixAU2Y/edit

השאלון:

שאלות רפלקציה

1. ציין דבר אותו למדת במהלך ביצוע הפעילות.
2. כתוב שלושה יתרונות וחסרונות בשימוש בסימולציה.
3. איך תרמה לך העבודה בזוגות? האם התחדש/ התחדד לך משהו שלא ידעת/ הבנת קודם?
4. איך תרם לך הדין הכיתתי? האם התחדש/ התחדד לך משהו שלא ידעת/ הבנת קודם?
5. מאיזה חלק בפעילות נהנית ביותר?

ביבליוגרפיה

- 1) *agrawal, g. p. (2002). fiber optic communication systems. new york: a john wiley & sons, inc., publication.*
- 2) האוניברסיטה הפתוחה. (1997). *סיבים ותקשורת אופטית*. תל אביב: האוניברסיטה הפתוחה.
- 3) האוניברסיטה הפתוחה. (2004). *תקשורת תקבילית ותקשורת ספרתית*. תל אביב: המרכז לטכנולוגיה חינוכית.

אתרי אינטרנט:

- 4) כץ, א'. (nov 2011). "Technoz (a.k.a. "Introduction to Electrical Engineering (a.k.a. "Technoz". אוחזר ב-2013, מתוך אתר האינטרנט של אורי כץ: <http://www.weizmann.ac.il/home/feori/Technoz.html>
- 5) שגב, מ'. *פיסיקה פלוס*. אוחזר מתוך http://physicaplus.org.il/articles3/segev_solitons.html
- 6) שמש, ל'. (2012). *מהו סיב אופטי ומהן תכונותיו*. אוחזר ב-29 9 2013, מתוך מכון דוידסון לחינוך מדעי: <http://davidson.weizmann.ac.il/online/askexpert/technology/%D7%9E%D7%94%D7%95-%D7%A1%D7%99%D7%91-%D7%90%D7%95%D7%A4%D7%98%D7%99-%D7%95%D7%9E%D7%94%D7%9F-%D7%AA%D7%9B%D7%95%D7%A0%D7%95%D7%AA%D7%99%D7%95-%D7%A7%D7%98%D7%99>
- 7) <http://www.school.kotar.co.il/kotarapp/index/Chapter.aspx?nBookID=93644684&nTocEntryID=93646602>
- 8) אורט - אלקטרואופטיקה. (אין תאריך). *אלקטרואופטיקה*. אוחזר ב-1 10 2013, מתוך אורט: <http://c3.ort.org.il/Apps/WW/page.aspx?ws=c95853ea-7439-4431-b760-fol=c0e34120-&page=3e98e78a-2822-41a6-a11b-f76b8cd85ab4&fa7e35c2dc614ca7-4855-b0f6-46466b61ed7b>
- 9) ויקיפדיה. (אוגוסט 2006). *אפנון משרעת*. אוחזר ב-2013, מתוך ויקיפדיה: http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:Amplitude-modulation_he.svg#filehistory
- 10) ויקיפדיה. (מרץ 2008). *אפנון פזה*. אוחזר ב-2013, מתוך http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:Phase_Modulation.png

- 11) ויקיפדיה. (דצמבר 2005). אפנון תדר. אוחזר ב- 2013, מתוך <http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:Frequency-modulation.png#filehistory>
- 12) ויקיפדיה. (9 6 2013). דיודה פולטת אור. אוחזר ב- 1 10 2013, מתוך ויקיפדיה: http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%93%D7%99%D7%95%D7%93%D7%94_%D7%A4%D7%95%D7%9C%D7%98%D7%AA_%D7%90%D7%95%D7%A8
- 13) ויקיפדיה. (2011). סיב אופטי. אוחזר ב- 3 10 2013, מתוך ויקיפדיה: http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A1%D7%99%D7%91_%D7%90%D7%95%D7%A4%D7%98%D7%99
- 14) ויקיפדיה. (אין תאריך). רוחב פס. אוחזר מתוך http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A8%D7%95%D7%97%D7%91_%D7%A4%D7%A1
- 15) ויקיפדיה. (7 7 2013). תא פוטו וולטאי. אוחזר ב- 1 10 2013, מתוך ויקיפדיה: http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%AA%D7%90_%D7%A4%D7%95%D7%98%D7%95-%D7%95%D7%95%D7%9C%D7%98%D7%90%D7%99