

## לייזרים לתקשורת אופטית InGaAsP/InP:

### רקע:

#### מערכת תקשורת אופטית

מערכת תקשורת אופטית היא מערכת שמבצעת תקשורת המשתמשת באור נראה או בקרינה אלקטרומגנטית בתדרים שאינם בתחום הנראה כנושא המידע בשידור.

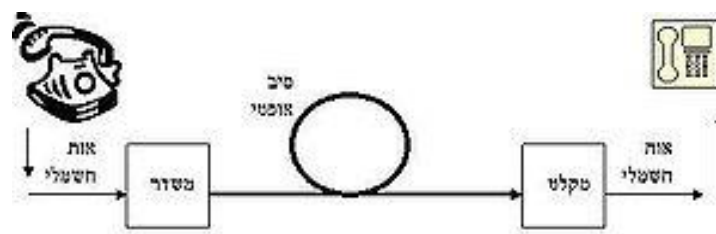
כל מערכת תקשורת אופטית מורכבת מאותם שלושה חלקים:

-המשדר האופטי – ההופך את המידע לאור.

-התווך – המעביר את המידע ליעדו.

-והמקלט – המקבל את המידע האופטי ביעד.

דוגמה פשוטה של מערכת תקשורת אופטית מתוארת באיור הבא:



איור 1: מערכת טלפוניה מבוססת תקשורת אופטית על ידי סיב אופטי [נלקח מתוך ויקיפדיה]

### למה אלקטרואופטיקה?

מערכת תקשורת אופטית מספקת שלל יתרונות על פני צורות תקשורת אחרות ובין היתר:

-קצב שידור גבוה – אינטואיטיבי כיוון שמהירות האור היא המהירה ביותר בטבע.

-רוחב סרט רחב – רוחב הפס =  $Bandwidth [bps]$  = כמות הנתונים שניתן להעביר בקו תקשורת בזמן נתון היא גדולה יותר מבדרך כלל, שזה כמובן אחד המצרכים החשובים ברשתות תקשורת מודרניות בימינו.

-טווח שידור ארוך – ברשתות תקשורת ה'מסורתיות' ישנה בעיה של כבלים ארוכים שמתפצלים פעמים רבות ובעקבות כך ירידה בעוצמת השידור שדורשת פיצוי על ידי מגברים. ברשתות אופטיות מבוססות סיב אופטי ההנחתה בעוצמת השידור בעקבות פיצול בכבל היא מאוד נמוכה. לשם השוואה בכבל חשמלי יש צורך במגבר כל כמה עשרות מטרים בעוד בסיב אופטי יש צורך במגבר רק כל כמה עשרות קילומטרים, כלומר פי שלושה סדרי גודל משמעותיים, וכמובן שזה גורר פישוט והוזלה מסוימת של המערכות (בהיבט הנ"ל).

יתרונות נוספים הם: חסינות לציתות או הפרעות, וחסכון במשקל ונפח.

למרות כל היתרונות האלו, השימוש במערכות אלקטרואופטיות אינו מושלם וכולל גם כמה חסרונות ובין היתר:

-המרת אור חשמלי לאופטי ולהפך – דבר שאינו דרוש במערכות שידור חשמליות רגילות, ודורש הוספת רכיבים שעושים את ההמרה הזאת, רכיבים יקרים שמוסיפים רעש למערכת ומגבירים את

יחס האות לרעש  $SNR$  ואת קצב שגיאת הביטים  $BER$  שהם שני מושגים חשובים בעולם התקשורת לתיאור טיב האיכות של מערכת תקשורת.

## לייזרים:

לייזר - Laser "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (השם המלא יקבל הסבר בהמשך העבודה) הוא התקן הפולט אור קוהרנטי, מונוכרומטי (בתחום צר של אורכי גל) ומקביל (בעל פיזור נמוך), שבמילים פשוטות יותר מסוגל לשגר אור למרחקים ארוכים באלומה צרה, מרוכזת ובעלת עוצמה גבוהה.

הלייזר הוא התקן בסיסי וחשוב מאוד בתקשורת אופטית ופיתוחו היווה לצעד חשוב בטכנולוגיה המודרנית של ימינו.

## תכונות:

קוהרנטיות גבוהה - קוהרנטיות של מקור קרינה היא היכולת שלו ליצור אלומת אור, אשר ניתנת לתיאור כחזית גל אלקטרומגנטי (כמו שלמדנו בקורס שדות אלקטרומגנטיים ביטויים מהצורה הכללית:  $\vec{E} = A \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi)$ ), שמתקדמת בכיוון התפשטות האלומה. כלומר, קוהרנטיות מבטאת את היכולת של גלי האור השונים לשמור על הפרשי פאזה קבועים, מה שמאפשר ליצור התאבכות בונה של הגלים ובכך לקבל תבנית התאבכות קבועה.

כדי להגיע להתאבכות קבועה יש לקיים 2 סוגי קוהרנטיות: זמנית ומרחבית

זמנית = בין כל שתי נקודות זמן על קו מסוים לאורך מסלול התקדמות האלומה נקבל הפרש פאזה קבוע.


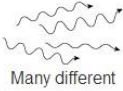


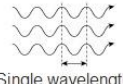
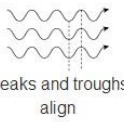
מרחבית = בין כל שתי נקודות על פני חתך כלשהו לאורך האלומה נקבל הפרש מופע קבוע.

שתי סוגי הקוהרנטיות מתקיימות ברמה גבוהה מאוד בלייזר ולכן הוא יוצר תבנית התאבכות קבועה, ולכן ניתן לתאר אלומת הלייזר כקרינה אלקטרומגנטית, באורך גל מוגדר, המתפשטת בכיוון מסוים כחזית גל בעלת רוחב מוגבל שצורתה אינה משתנה בזמן.

מונוכרומטיות גבוהה - אלומת הלייזר היא מונוכרומטית כלומר חד-צבעית משמע מורכבת מאורך גל יחיד. מקור הלייזר פולט אור בתחום ספקטרלי צר מאוד סביב אורך גל מרכזי אחד. משמע לאלומת הלייזר יהיה צבע אחיד וברור בניגוד לאלומת אור רגילה. אבל אין לייזר שהוא מונוכרומטי לחלוטין באופן אידיאלי שמשדר אור בעל אורך גל יחיד באמת, אלא ללייזרים שונים תהיה מידה שונה של מונוכרומטיות שנקבעת לפי רוחב התחום הספקטרי של תדרי האור המרכיבים את האלומה.

כיווניות גבוהה - פיזור האלומה הוא נמוך, כלומר גלי האור של הלייזר מתקדמים בקו ישר בלבד, כמובן שתופעת העקיפה שלמדנו עליה בקורס מבוא לאלקטרואופטיקה באה לידי ביטוי בהקשר הנ"ל ואלומת הלייזר כן מתפזרת מעט, אך באופן זניח ובקצב איטי שלא משפיע על הספק האור יותר מידי לעומת אלומת אור רגילה.

שלושת התכונות הנ"ל וההתבטאות שלהן בלייזר לעומת אור רגיל מסוכמות באיור הבא:

	Directivity (light waves travel in straight line)	Monochromaticity	Coherence
Ordinary light	 Light bulb	 Many different wavelengths	
Laser beam	 Laser	 Single wavelength	 Peaks and troughs align

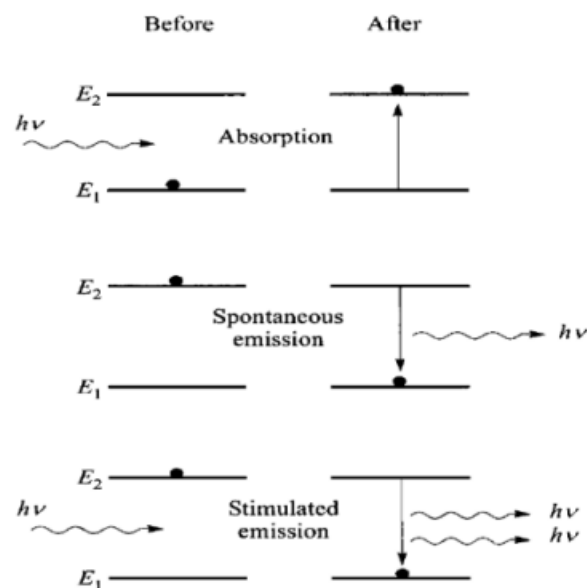
איור 2: סיכום תכונות לייזר והשוואה לאור רגיל [נלקח מתוך ויקיפדיה]

## רקע לצורת הפעולה של לייזר

### מנגנוני אינטראקציה (בליעה ופליטה) של אור בחומר

תהליכים אלו הם תהליכי הבסיס בהתקנים אופטואלקטרוניים, ולכן גם התעסקנו בהם במרבית החצי השני של הקורס, והם גם הבסיס לפעולת הלייזר.

ראשית אציג את האיורים המאתרים את התהליכים שנתעסק בהם, שכן לדעתי הם מספקים את ההסבר הכי ברור לכל אחד ולהבדלים בינם:



איור 3: מנגנוני אינטראקציה (בליעה ופליטה) של אור בחומר [נלקח מתוך תרגול 12 בקורס]

את האור הנקלט והנפלט ניתן לאפיין על ידי אורך גל  $\lambda$  ותדר אופטי  $\nu$  כיוון התפשטות, כיוון השדה החשמלי במרחב (הקיטוב) והמופע (הפאזה  $\phi$ ) ביחס לרגע ייחוס כלשהו. ניתן לתאר את האור גם במונחים של אנרגיה, ידוע שכל פוטון בתדר  $\nu$  הוא בעל אנרגיה  $E = h\nu$  כאשר  $h$  קבוע פלאנק.

כזכור מתורת הקוונטים, לכל אטום יש אוסף בדיד של מצבים או של רמות אנרגיה בהן הוא יכול להימצא, והוא ייחודי לכל סוג של אטום, כלומר לסוגי החומרים השונים.

מעבר בין רמות האנרגיה הוא למעשה עלייה או ירידה באנרגיה הכוללת של האטום והוא גורם בסופו של דבר לבליעה או פליטה של אנרגיה. האנרגיה הנפלטת או הנבלעת יכולה להופיע בכמה צורות, כאשר הצורה הנפוצה ביותר היא קרינה אלקטרומגנטית שהיא למעשה נקראת 'פוטונים'.

כאשר הבליעה והפליטה של האנרגיה באטום היא בצורת פוטונים, כל מעבר של אטום בין שתי רמות אנרגיה סמוכות יהיה מאופיין בבליעה או פליטה של פוטון בתדר שמתאים בדיוק להפרש בין

$$\text{שתי רמות האנרגיה, כלומר תדר הפוטון הנפלט או נבלע יהיה: } \nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

אם אטום יורד מרמת האנרגיה  $E_2$  לרמת אנרגיה נמוכה יותר  $E_1$  הוא יפלוט פוטון בתדר  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$

אם פוגע באטום פוטון בתדר  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$  הוא יעלה מרמת האנרגיה  $E_1$  ל-  $E_2$ .

הגורמים לתהליכים אלו:

עבור בליעת פוטון הגורם הוא די פשוט להבנה, כאשר פוטון בעל תדר  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$  ייפגע באטום שנמצא ברמת האנרגיה  $E_1$  ויש מעליו רמת אנרגיה  $E_2$  הפוטון יבלע והאטום יעבור לרמה הגבוהה.

עבור פליטת פוטון העניין קצת יותר מסובך ויש להפריד בין שני מקרים:

ראשית חשוב להבין שאטום בצורתו הטבעית וללא כל התערבות חיצונית תמיד יישאף להימצא ברמת האנרגיה הנמוכה ביותר, רמת היסוד, כיוון ששם הוא פחות רגיש להפרעות ולכן יציב יותר. לכן למשל במצב הטבעי בטמפרטורת החדר ככל שעולים ברמות האנרגיה האכלוס בכל אחת מהן קטן יותר.

בהמשך לכך, כל אטום יישאף בנוסף להימצא בשיווי משקל תרמו-דינאמי, שבמצב זה כמות האנרגיה שפולט האטום תהיה זהה לכמות האנרגיה שקולט האטום ביחידת זמן. כלומר אם פוטון פוגע באטום ומעלה אותו לרמת אנרגיה גבוהה יותר, האטום ישאף להיפטר מעודף האנרגיה כמה שיותר מהר על ידי פליטת פוטון ובכך לרדת בחזרה למצבו ההתחלתי.

### פליטה ספונטנית ופליטה מאולצת

אם השאיפה הנ"ל לרדת ברמת האנרגיה על ידי פליטת פוטון מתרחשת באופן עצמאי וספונטני, ביוזמתו של האטום בלבד וללא כל התערבות חיצונית, זו פליטת פוטון ספונטנית (Spontaneous Emission), הפוטון הנפלט בפליטה הוא בעל תדר  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$  אבל שאר תכונותיו כמו כיוון התקדמותו והפאזה הן ספונטניות (רנדומליות).

המקרה השני של פליטת פוטון הוא על ידי פליטת מאולצת (Stimulated Emission), במקרה הזה ישנו תחילה אטום שכבר מעורר ברמת אנרגיה  $E_2$  ויש לו אפשרות למעבר פליטה לרמת אנרגיה נמוכה יותר  $E_1$ , והיא תתרחש כאשר ייפגע פוטון נוסף באטום המעורר בעל תדר  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ , לכן נפלטים יחד שני פוטונים אחד ישן שיצר את התהליך ואחד חדש שנוצר מהתהליך, שניהם זהים לגמרי גם בקיטוב ובפאזה ולכן למעשה יוצרים הגברה אופטית.

שימוש באפקט הפליטה המאולצת מאפשר "להכפיל" פוטונים שוב ושוב – מפוטון אחד יצאו שניים, ולאחר מכן 4, ואז 8 וכן הלאה.

פליטה מאולצת הינה התהליך הבסיסי לפעולת הלייזר, וממנה גם נגזר שמו של הלייזר: LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

## פעולת הלייזר

פעולת הלייזר מבוססת על תהליך הפליטה המאולצת של פוטון ועל מעבר שלו בתוך תווך מגביר (מהוד פברי פרו) כך שנוצר הגבר אופטי, שאותו מחלצים על ידי הורדת הרפלקטיביות  $R$  של אחת ממראות המהוד.

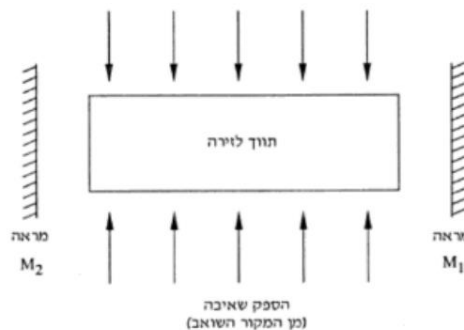
### מבנה כללי

ישנם 3 חלקים ללייזר:

-תווך מגביר – חומר עשוי אטומים מתאימים שבאמצעות "שאיבה" (החלק הבא בלייזר) ינצל את תהליך הפליטה המאולצת כדי לפלוט פוטון שיתחיל את פעולת הלייזר.

-המקור השואב – זהו בעצם מקור אנרגיה המפעיל מתח חשמלי אשר נותן אנרגיה לאלקטרונים הנמצאים ברמה הנמוכה בחומר שבתווך המגביר (החלק הקודם), ובכך "מקפיץ" את כל האלקטרונים שבחומר לרמות גבוהות, כך שהאטומים בהן מעוררים כבר ו"מוכנים" לפליטה מאולצת. באנלוגיה נחמדה אפשר לומר שהמקור השואב הוא המזניק של האטומים לקראת פעולת הלייזר והוא אומר להם: "היכון..." (ה – "הכן, צא!" יגיעו אחר כך). בתרגול תהליך זה נקרא "היפוך אוכלוסין" - מצב בו רוב נושאי המטען ברמה אנרגטית גבוהה יותר.

-מהוד אופטי - שתי מראות שיוצרות מהוד פברי פרו. כדי לנצל עד תום את החומר המגביר (והפליטות המאולצות), נרצה שהאור יעבור בו מספר רב של פעמים, הלוך וחזור, וכל פעם יוגבר עוד. לשם כך נשתמש במהוד, התקן בעל שתי מראות הניצבות זו מול זו ותפקידו להוליך אור במסלול מחזורי. כאשר קרן האור נתקלת במראת המהוד היא מסתובבת ומשנה כיוון, וכך האור מתקדם הלוך ושוב.



איור 4: מבנה לייזר וחלקיו [נלקח מתוך תרגול 12 בקורס]

### הנחות יסוד

תחילה כדי להבין את פעולת הלייזר נניח לייזר אידיאלי, ובהמשך נדבר על לייזר לא אידיאלי.

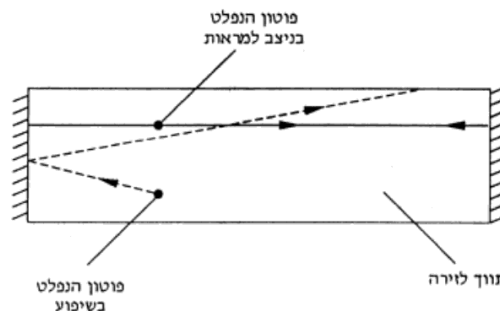
נניח: תופעת העקיפה במהוד לא מתרחשת, המראות במהוד הן מישוריות ובעלות החזרה מלאה (בהמשך נראה שלא כך הדבר), התווך המגביר בולע כל פוטון שנוגע בו, ולשם פשטות נניח גם שיש רק שתי רמות לכל אטום: רמת היסוד והרמה המעוררת.

### הסבר הפעולה וההגברה

כפי שכבר ציינתי, פעולת השאיבה יוצרת את היפוך האוכלוסין הדרוש ומקפיצה את האטומים לרמה המעוררת כך שיהיו מוכנים לפליטה מאולצת.

כעת נניח שקרתה פליטת פוטון, מה קורה עכשיו? צריך לחלק למקרים ולמצוא את המקרה הרצוי שלנו שיביא להגבר שאנחנו רוצים לראות בסופו של דבר.

אם הפוטון נפלט בזווית (ביחס למרות) כפי שמתואר באיור הבא:



איור 5: אפשרויות פליטת הפוטון במהוד [נלקח מתוך הספר 'לייזרים – עקרונות ושימושים' של האונ' הפתוחה מאת זאב ויסמן]

יכולים לקרות 3 דברים:

- הפוטון ימשיך ללא הפרעה עד שיחזור לתווך המגביר ויבלע בו.

- הפוטון ייפגע באטום ברמת היסוד ויעורר אותו, וכעת יש אטום נוסף שמוכן לפליטה.

- הפוטון ייפגע באטום שכבר מעורר ובכך נוצרת פליטה מאולצת שבסופה נקבל שני פוטונים זהים, וכעת ניצבות בפני כל אחד מהפוטונים אותן 3 אפשרויות, ולכן בסבירות גבוהה שבסופו של דבר התהליך לא יחזור על פליטה מאולצת באופן כזה שייצור הגבר משמעותי.

אז סך הכל לא מצאנו כאן את המקרה הרצוי שיביא להגבר, לכן נעבור למקרה שבו הפוטון נפלט בניצב למראות, כפי שמתואר באיור 4.

גם כאן יכולים לקרות 3 דברים:

- הפוטון יחזור בין המראות

- הפוטון ייפגע באטום ברמת היסוד ויעורר אותו, וכעת יש אטום נוסף שמוכן לפליטה.

- הפוטון ייפגע באטום מעורר ובכך נוצרת פליטה מאולצת שבסופה נקבל שני פוטונים זהים שגם הם ניצבים למראות ויש הסתברות גבוהה שגם הם ייפגעו באותה צורה באטום מעורר ובכך מצאנו את המקרה הרצוי שמביא להגבר משמעותי של הפליטות המאולצות בתווך המגביר.

אך כמובן שלייזר אמיתי הוא אינו אידיאלי ובעקבות תהליכים שונים שמתרחשים במקביל להגברה הנ"ל ישנם תהליכים נוספים המגבילים אותה למשל כמו התאבכות הורסת שיכולה להיווצר בין הגלים השונים.

קיבלנו מצב בו בתוך המהוד נעה חבורה הולכת וגדלה של פוטונים כאשר לכולם אותן תכונות: אורך גל, כיוון התקדמות ופאזה. ניתן לתאר את התופעה בתור גל אלקטרומגנטי שמתפשט בתוך המהוד, אשר מוחזר הלך ושוב משתי המראות, כאשר עוצמתו הולכת וגדלה עד שמגיעה לרוויה.

הצלחנו לכלוא הגבר של פוטונים במהוד, איך נשתמש בו?

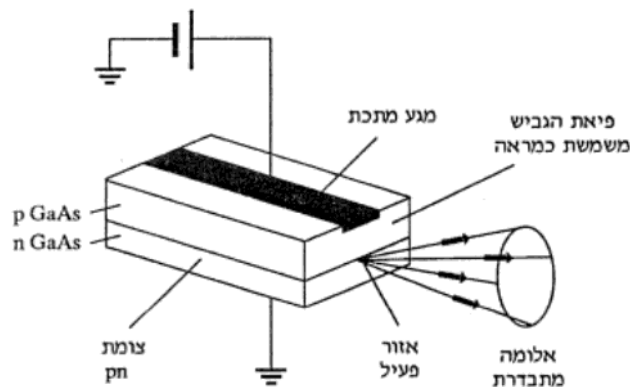
בפועל אחת המראות תהיה בעלת רפלקטיביות נמוכה כלומר  $0 < R < 1$  ובכך מהצד החיצוני של אותה מראה נקבל את פליטת הלייזר הרצויה, כיוון שזוהי אותה אלומת אור שהתפתחה ותהגברה

בתוך המהוד, רק שהיא מונחתת פי  $R$  בעוצמתה, ולכן אם נסמן את הגבר המהוד הפנימי ב  $G$  נצטרך לדרוש עבור הגבר כולל של הלייזר כי  $G \cdot R > 1$ .

## שימוש נפוץ: דיודת לייזר

### מבנה כללי

הלייזר הקטן ביותר שקיים, וכנראה גם הנפוץ ביותר הוא לייזר המוליך למחצה הידוע גם בתור דיודת לייזר. לדיודת לייזר יתרונות רבים וביניהם: גודל קטן, יעילות גבוהה, קצב אפנון גבוהה, עלות נמוכה, ומגוון רחב של צבעים שאפשר ליצור עבורם דיודת לייזר (בעלי אורך גל בטווח של  $0.75 \mu m < \lambda < 1.6 \mu m$ ).



איור 6: מבנה עקרוני של דיודת לייזר פשוטה מבוססת GaAs [נלקח מתוך הספר 'לייזרים – עקרונות ושימושים' של האוני' הפתוחה מאת זאב ויסמן]

כפי שניתן לראות בקלות, דיודת הלייזר היא בסופו של דבר צומת  $PN$  בין שני חומרי מוליך למחצה. בהקשר של המושגים שעסקנו בהם לפני כן ניתן לומר כי:

- התווך המגביר – הוא במקרה הפשוט הזה צומת  $PN$  מבוססת GaAs.

- המקור השואב – הוא הזרם החשמלי הקדמי המוזרם לצומת.

- מהוד אופטי – פאות הגביש שמשמשות כמראות היוצרות מהוד פברי פרו בין התווך המגביר כדרוש.

### פעולת הדיודה

המקור השואב, הלא הוא הזרם החשמלי, מפעיל ממתח קדמי על צומת  $PN$ , במטרה ליצור את היפוך האוכלוסין הדרוש ללייזר כפי שתיארתי כבר. ממתח קדמי על צומת  $PN$  כזכור מכופף את פסי האנרגיה, מעורר את האטומים בחומר כך שכעת ריכוז האלקטרונים ברמת ההולכת גדול יותר מריכוז האלקטרונים ברמת הערכיות.

פליטת הפוטונים בחומר מוליך למחצה מתבטאת בצורה של גנרציה ורקומבינציה של זוגות אלקטרון-חור. אם אלקטרון מרמת ההולכה עושה רקומבינציה עם חור מרמת הערכיות זאת בעצם פליטה ספונטנית של פוטון, ואילו אם יש גנרציה ונוצר זוג אלקטרון-חור חדש זאת בעצם בליעה של פוטון.

לאחר שמתרחשת פליטה ספונטנית של פוטון, אותו הפוטון 'הספונטני' יכול לפגוע באלקטרון שנמצא ברמת ההולכה ובכך לגרום לפליטה מאולצת של פוטון נוסף והורדת האלקטרון מפס

ההולכה לפס הערכיות, אפשרות נוספת היא לפגוע באלקטרון שנמצא ברמת הערכיות ולעלות אותו לרמת ההולכה ובכך ליצור עוד אלקטרון מעורר שמוכן לפגיעה בו ויצירת פליטה ספונטנית.

לאחר שהופעל הממתח הקדמי ופסי האנרגיה התכופפו, יש יותר סיכוי לגנרציה ורקומבינציה. ואם המתח הקדמי יהיה חזק מספיק נוכל להגיע להיפוך האוכלוסין הדרוש שבו בעצם מקבלים מצב שההסתברות לפליטות מאולצות בחומר תהיה יותר גדולה מההסתברות לבליעות בחומר, וכמובן שזה המצב הרצוי כיוון שכפי שכבר הסברתי, אם נקבל מספיק פליטות מאולצות התוך הצומת יתקבל ההגבר האופטי כפי שהוסבר כבר.

כמובן שהשאיבה של התווך המגביר אינה מספיקה לבדה כדי ליצור את הפעולה השלמה של הלייזר ויש גם צורך במהוד אופטי שתורם להגבר. המהוד האופטי נוצר בדיודת הלייזר על ידי שימוש בפאות הגביש. בדרך כלל לא נשתמש בשיטה הרגילה ליצירת מראות על הגביש (שכוללת לשים שכבת מתכת מתאימה עליו) אלא נשתמש בתכונות הגביש ואז בדרך כלל הרוב הגדול של הקרינה הפוגעת בקצות הגביש מוחזר בגלל ההבדל בין מקדם השבירה בתוך החומר לבין מקדם השבירה של האוויר. בנוסף צריך לתכנן את קצוות הגביש כך שיהיו מקבילות זו לזו כדי לקבל פעולה אופטימלית של ההוד.

למרות שפאות הגביש משמשות כמראות כמעט מושלמות, אך הן אינן אידאליות מכיוון שאלומת אור נפלטת משני צידי הגביש, בעוד שאנו מעוניינים באלומה אחת, ויתר על כן האלומה שיוצאת מהצד השני של הגביש גורמת לבזבז הספק, כיוון שהאור הנפלט ממנה מתבזבז. כדי למנוע אפקט זה מצפים את אחת הפאות בחומר בעל החזרה מלאה, כך שהפאה בפועל תהיה כמו מראה אידאלית.

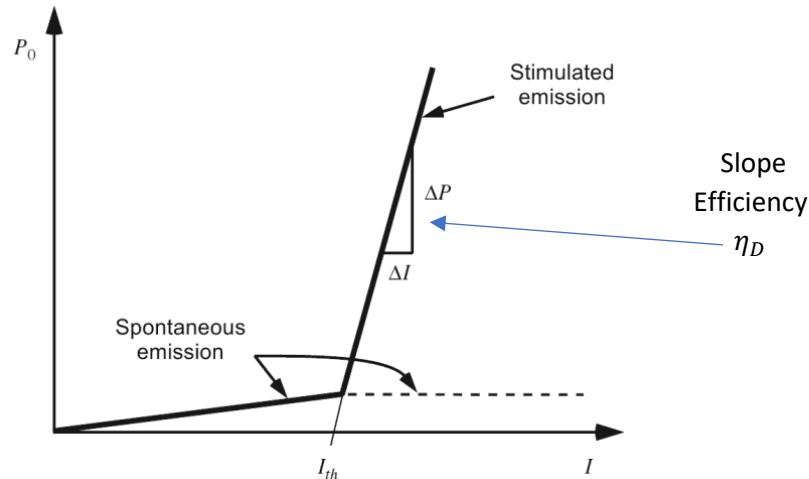
עד כה הצגתי דיודת לייזר מבוססת צומת  $PN$  הכוללת חומר מסוג אחד ( $Homojunction$ ), אבל על ידי שימוש בצומת  $PN$  הכוללת כמה סוגי חומרים ( $Heterojunction$ ) ניתן לקבל יעילות אפילו גבוהה יותר של דיודת הלייזר. בצמתים מהסוג השני אנחנו מקבלים תופעה של פליטת פוטונים באופן ספונטני משני משטחים (משני חיבורי החומר האמצעי לחומרים הצדדיים). בנוסף, אנו מקבלים שעובי השכבה בה מתרחשת ההגברה האופטית היא קטנה יותר כך שפעולת הפליטה המאולצת וההגברה האופטית יעילה יותר.



## מאפיינים

בין המדדים החשובים של דיודת לייזר הם:

$I_{th}$  = זרם הסף, הזרם שמזרימים לתווך המגביר שרק מעליו נוצר היפוך האוכלוסין המאפשר את פעולת הלייזר. ניתן לראות את השפעת זרם הסף על פעולת הדיודה באיור הבא:



איור 7: עקומת  $P-I$  של דיודת לייזר [נלקח מתוך הספר *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* מאת Larry A. [ , Milan L., Scott W. Corzine Coldren

באשר:  $P_{out} = \eta_D (I_{out} - I_{th})$ . והיעילות הקוונטית הדיפרנציאלית ( *Differential Quantum Efficiency* ) מוגדרת להיות  $\eta_{ex} = \frac{e}{h\nu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (I > I_{th})$  והמשמעות של היעילות הזו היא כמות הפוטונים הנפלטים החוצה ביחס למספר אלקטרוני ההולכה (האלקטרונים המעוררים), ובדיודת לייזר מתקבלת  $\eta_{ex}$  מאוד גבוהה.

(הערה: יש סימונים שונים ליעילויות השונות שמוגדרות עבור דיודת לייזר בין המקורות השונים, אך אני מציג אותם כאן לפי איך שמוצג בספר של זאב ויסמן 'לייזרים – עקרונות ושימושים' למרות שלדעתי שיטת הסימון שלו פחות מסתדרת עם השמות).

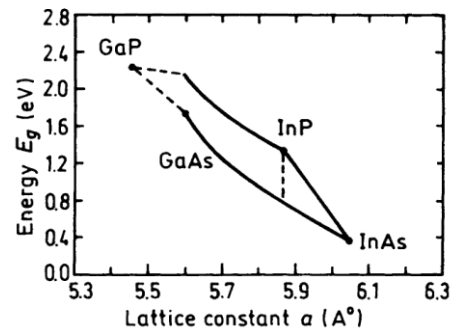
כמובן שישנם עוד מאפיינים רבים לדיודת לייזר אבל אלו הם העיקריים והמעניינים ביותר.

## דיודת לייזר מבוססת InGaAsP/InP

### מבנה כללי

הכוונה היא לדיודת לייזר שהתווך המגביר בה עשוי מצומת PN שבה אחד הצדדים הוא הרכבה קוואנטרנית של מוליכים למחצה InGaAsP והצד השני הוא הרכבה כפולה של מוליכים למחצה InP.

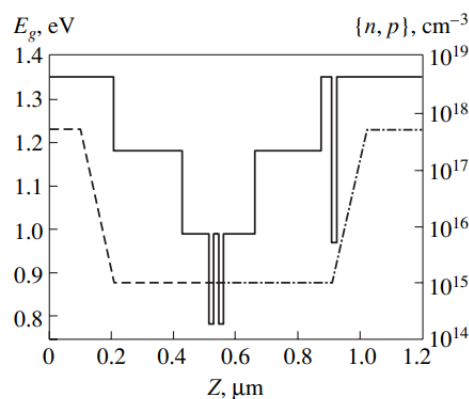
כפי שלמדנו בקורס על מנת ליצור את ההרכבה ללא דפקטים יש צורך בתיאום קבוע הסריג בין החומרים השונים, ועל ידי כך ניתן גם לשנות ולכוון את אנרגיית הפער, כזכור בהרצאה ראינו את הגרף הבא:



איור 8: התאמת קבוע סריג לאנרגיית פער בהרכבות נפוצות [נלקח מתוך האתר NSM Archive]

רואים בגרף שעל מנת ליצור התאמה בין InGaAs ל InP יש צורך בהרכב:  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  ושכעת פער האנרגיה יכול לקבל ערכים בין  $0.75 \text{ eV} < E_g < 1.35 \text{ eV}$  לפי הנוסחה:  
 $E_g(y) = 1.344 - 0.738y + 0.138y^2$  [eV]  
 הפוטונים שייפלטו מדיודה המיוצרת מחומר זה ומקל על השימוש בה לצורכי תקשורת אופטית. בהרצאה קראנו לזה BangGap Engineering\Tailoring.

חיבור שני החומרים יוצר דיודת PN בעלת דיאגרמת פסים כזו:



איור 9: דיאגרמת פסים של InP/InGaAsP [נלקח מתוך המאמר Analysis of Threshold Current Density and Optical Gain in InGaAsP Quantum Well Lasers by N. A. Pikhtin, S. O. 2001]

## מאפיינים

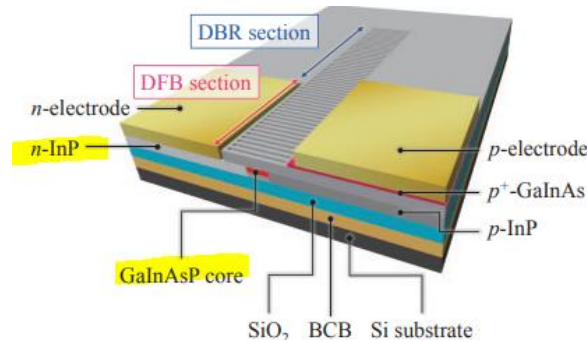
בדרך כלל נרצה לייצר דיודות לייזר מחומרים בעל פער אנרגיה נמוך יחסית, כדי שלא נצטרך להפעיל מתח גדול על הרכיב על מנת לקבל את התוצאה הרצויה ורואים שניתן להשיג זאת במקרה הזה (של דיודת לייזר מבוססת InGaAsP\InP) על ידי כונון פער האנרגיה כרצוננו.

שימוש בדיודת לייזר מבוססת InGaAsP\InP מאפשרת פליטת פוטונים באורך גל של  $1.3 \mu\text{m} < \lambda < 1.6 \mu\text{m}$ , בהתאם לפער האנרגיה שנבחר. אורך הגל כזה של הפוטונים מאפשר תקשורת אופטית באמצעות סיבים אופטיים, שהם כאמור הטכנולוגיה המתקדמת ביותר שזמינה לציבור הרחב למשל לשימוש גלישה באינטרנט מהיר.

חומרים מוליכים למחצה מהסוגים האלו, משלבים חומרים מהטור ה-13 והטור ה-15 בטבלה המחזורית, הם בעלי פסי אנרגיה ישירים ומוביליות אלקטרונים גבוהה, שתי תכונות דברים שמשפרות מאוד את היכולות האופטיות של החומר.

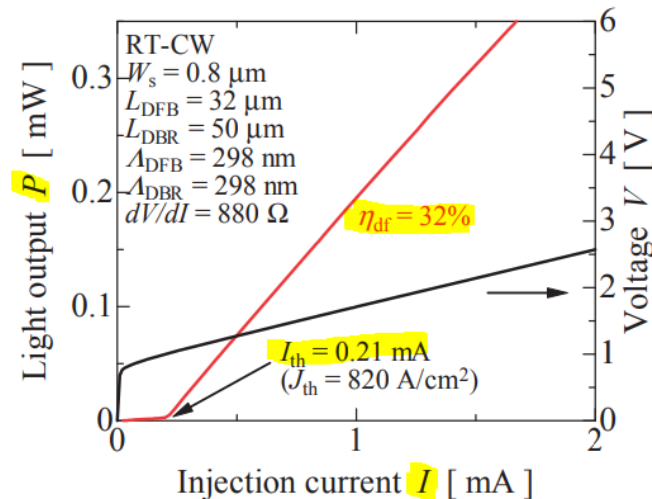
## דוגמה לרכיב דיודת לייזר מבוססת InGaAsP/InP

מבנה הרכיב שבחרתי להראות את ממצאיו מתואר באיור הבא:



איור 10: מבנה דיודת לייזר מבוססת InGaAsP/InP [נלקח מתוך המאמר High-differential quantum efficiency operation of GaInAsP/InP membrane distributed-reflector laser on Si]

כעת אציג את המדידות על הרכיב הנ"ל שמתארות את המאפיינים שהצגתי בחלק הקודם של העבודה: אופייני I-P:



איור 11: אופייני I-P ו-V עבור הרכיב [נלקח מתוך המאמר High-differential quantum efficiency operation of GaInAsP/InP membrane distributed-reflector laser on Si]

ניתן לראות כי עבור הרכיב הנ"ל מתקבלת יעילות קוונטית דיפרנציאלית של:

$$\eta_{ex} = \frac{e}{h\nu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta I} = 32\%$$

ובנוסף זרם הסף עבורו מתחיל להיווצר היפוך אוכלוסין והדיודה מתחילה לעבוד הוא:

$$I_{th} = 0.21 [mA]$$

לפי מה שמצוין במאמר, שנכתב בשנת 2017 ונחשב יחסית עדכנית, זוהי היעילות הגבוהה ביותר שנמצאה עד כה לרכיבים מהסוג הזה.

## סיכום:

לסיכום, הלייזר בכלל ודיודת הלייזר בפרט היא רכיב חשוב מאוד בעולם התקשורת האופטית שמתבסס על העקרונות הבסיסיים שלמדנו בקורס.

## **ביבליוגרפיה:**

ויקיפדיה:

[תקשורת אופטית](#)

[לייזר](#)

[לייזר דיודה](#)

ההרצאות והתרגולים בקורס

רוב העבודה נכתבה על פי ספרו של זאב ויסמן '[לייזרים – עקרונות ושימושים](#)' בהוצאת האוניברסיטה הפתוחה.

['Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits'](#). By Larry A. Coldren, Scott W. Corzine, Milan L. Mashanovitch.

הדוגמה לרכיב דיודת לייזר הובאה מתוך המאמר:

['High-differential quantum efficiency operation of GaInAsP/InP membrane distributed-reflector laser on Si'](#). By Takahiro Tomiyasu, Takuo Hiratani, Daisuke Inoue, Nagisa Nakamura, Kai Fukuda, Tatsuya Uryu, Tomohiro Amemiya, Nobuhiko Nishiyama, and Shigehisa Arai. (April 2017).

הנתונים על ה InGaAsP\InP הובאו מתוך האתר:

[NSM](#)

ומתוך המאמר:

'Analysis of Threshold Current Density and Optical Gain in InGaAsP Quantum Well Lasers' By N. A. Pikhtin, S. O. Sliptchenko, Z. N. Sokolova, and I. S. Tarasov (August 2001)