

# פליטה של אטומים

- נדון כאן בפונקציות הגל של האלקטרונים הקשורים לאטומים, ונניח לשם הפשטות שיש שתי רמות אנרגיה המתאימות לשתי פונקציות גל אלו, רמה גבוהה ורמה נמוכה (רמת היסוד).
- בנוכחות של שדה אלקטרומגנטי, פונקציות הגל אינן סטציונריות לחלוטין.
- סטציונריות אפשרית רק כאשר האלקטרונים נמצאים במצב היסוד, בנוכחות שדה הריק בלבד.
- פרט למקרה זה יש מעברים שבהם אנרגיה עוברת הלך וחזור בין האטום ובין הגל האלקטרומגנטי.
- האטום מתנהג כאנטנה של דיפול מתנדנד במהלך העברת האנרגיה.
- יחסי המופע בין הדיפול ובין הגל קובעים אם האטום מקבל או פולט קרינה.
- הפליטה יכולה להיות ספונטנית או מאולצת.
- **פליטה ספונטנית** קורה כאשר אטום נמצא ברמה גבוהה ומושפע על ידי שדה הריק.
- במקרה כזה המופע הוא לרוב אקראי, וגם השדה הנפלט הוא אקראי במופעו.
- ניתן להדגים זאת בניסוי שבו אטומים נמצאים במהוד זעיר.
- מקטינים את גודל המהוד עד שאופן התנודה הראשון שלו מגיע לתדר מעל המעבר לרמת היסוד.
- במקרה כזה אין תנודות אקראיות בריק בתדר הנכון ליצירת המעבר, ואורך החיים של הרמה אינסופי.

# פליטה ובליעה מאולצות

- **פליטה מאולצת** קורה כאשר אטום נמצא ברמה גבוהה ומושפע על ידי שדה אלקטרומגנטי גדול משדה הריק.
- האטום מעורר בתדר מסוים, ויורד לרמה הנמוכה תוך פליטת קרינה.
- כיון שהמופע של האטום בעת העירור תאם את מופע הגל המעורר, גם מופע הגל הנפלט **זהה**.
- נוצר גל שני, קוהרנטי עם הגל הראשון.
- **בליעה מאולצת** קורה כאשר אטום נמצא ברמה הנמוכה.
- בצורה הפוכה מן הפליטה המאולצת, המופע **מתהפך** והאטום בולע את הקרינה.
- איינשטיין הציע קשר בין קצבי הפליטה הספונטנית והמאולצת.
- נתבונן בצבר גדול של אטומים השרויים בקרינה איזוטרופית של גוף שחור.
- נניח שצפיפות הקרינה היא  $u(\omega)$  וטמפרטורת הגוף השחור היא  $T$ .
- נסמן את מספר האטומים ברמה הנמוכה (רמת היסוד) ב- $n_1$  ואת מספרם ברמה הגבוהה ב- $n_2$ .
- הפרש האנרגיה בין שתי הרמות הוא  $\delta E = \hbar\omega$ , כלומר,  $\omega$  הוא התדר המתאים להפרש אנרגיה זה.

# קבועי איינשטיין

- לפי בולצמן, יחס מספרי האטומים בשתי הרמות תלוי בטמפרטורת הגוף השחור

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp \frac{\delta E}{k_B T} = \exp \frac{\hbar \omega}{k_B T}$$

- המעברים הספונטניים מהרמה הגבוהה לנמוכה תלויים בשדה הריק, שאינו כלול בצפיפות האנרגיה של הגוף השחור,  $u(\omega)$ . קצב המעבר יחסי רק למספר האטומים ברמה הגבוהה, לפי  $A n_2$  ( $A$  קבוע).

- המעברים המאולצים תלויים בצפיפות הקרינה ובקבוע אחר  $B$ , לפי  $B u(\omega) n_2$ . ביחד נקבל

$$r_{21} = A n_2 + B u(\omega) n_2$$

- במעבר ההפוך לרמה הגבוהה אין תרומה ספונטנית ומקבלים

$$r_{12} = B u(\omega) n_1$$

- מכיון ששני קצבי המעבר בין הרמות שווים במצב של שווי משקל, מקבלים

$$B u(\omega) (n_1 - n_2) = A n_2$$

$$\frac{A}{B u(\omega)} = \frac{n_1 - n_2}{n_2} = \frac{n_1}{n_2} - 1 = \exp \frac{\hbar \omega}{k_B T} - 1$$

# צפיפות קרינה

- קיבלנו שיחס קבועי איינשטיין הוא

$$\frac{A}{B} = u(\omega) \left( \exp \frac{\hbar \omega}{k_B T} - 1 \right)$$

- יחס זה תלוי בצפיפות הקרינה של הגוף השחור התלוי במספר הפוטונים באופנים השונים, באנרגיה שלהם ובצפיפות המצבים. אם נפח הגוף השחור הוא  $L^3$  אזי צפיפות האנרגיה שלו היא

$$u(\omega) = \langle n(\omega) \rangle \hbar \omega D(\omega) = \frac{1}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1} \hbar \omega \frac{L^3 \omega^2}{\pi^2 c^3} = \frac{\hbar L^3}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1}$$

- מכאן שיחס קבועי איינשטיין הוא

$$\frac{A}{B} = \frac{\hbar L^3 \omega^3}{\pi^2 c^3}$$

- אם הקרינה המאולצת חזקה בהרבה מהספונטנית, אזי  $u(\omega) \gg A/B$  וצפיפות האנרגיה המזערית תהיה

$$u(\omega) \gg \frac{\hbar L^3 \omega^3}{\pi^2 c^3} \Rightarrow \langle n(\omega) \rangle \gg 1$$

- מספר הפוטונים בתדר תנודה זה גדול מאוד.

# עוצמת סף

- מצפיפות האנרגיה נקבל את עוצמת האור בסף

$$I(\omega) = cu(\omega) >> \frac{\hbar L^3 \omega^3}{\pi^2 c^2}$$

- בגלי מיקרו, אורך הגל כשני ס"מ והתדר  $\omega = 10^{11}$  Hz. הסף הוא  $3 \times 10^{-20}$  J m<sup>-3</sup>.
- שטף זה מיתרגם לערך  $10^{-11}$  W m<sup>-2</sup> שהוא קטן מאוד. כלומר בגלי מיקרו, הפליטה הספונטנית זניחה.
- בתחום הנראה אורך הגל כחצי מיקרון והתדר  $\omega = 3 \times 10^{15}$  Hz. הסף הוא  $7 \times 10^{-7}$  J m<sup>-3</sup>.
- כאן השטף מיתרגם ל-  $20$  W m<sup>-2</sup> שהוא רב עוצמה. לכן הפליטה הספונטנית משמעותית ביותר.
- כיום החלו לבנות ליזרים בקרני רנטגן, שם הדרישות קשות עוד בהרבה.

- בגלל התלות החזקה באורך הגל, קשה לקבל פליטה מאולצת באור הנראה.
- המכשירים הראשונים שהשתמשו באפקט זה נקראו מייזרים, על פי ראשי התיבות

Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation

- רק לאחר זמן החלו לבנות ליזרים בנראה, כאשר ראשי התיבות הן עכשיו

Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation

- במונח ליזר מתכוונים היום למקור אור שבו הקרינה המאולצת היא השליטה ביחס לקרינה הספונטנית.

# קוהרנטיות בליזר

- ההבדל המשמעותי בין הגל המאולץ והספונטני הוא **קוהרנטיות**.
- כל פוטון מאולץ הוא במופע אחד עם הפוטון שאילץ אותו, וכך הגל גדל ברצף עם קוהרנטיות זמנית מושלמת. אם יודעים את המופע בזמן אחד בגל, המופע בכל זמן אחר ידוע אף הוא.
- הסטיות ממצב זה נובעות מהפליטה הספונטנית, הנובעת מהתנודות האקראיות בריק. הפליטה הספונטנית מקלקלת את קוהרנטיות המופע המושלמת. כאן נזניח פליטה זו.
- הזנחת הפליטה הספונטנית אפשרית רק כאשר צפיפות האנרגיה היא גבוהה ביותר, כלומר הגל האלקטרומגנטי חודר וחוזר וחודר את החומר, כמו למשל במהוד בעל תדירות אופינית  $\omega$ .
- הפליטה והבליעה המאולצת בלבד משתי רמות החומר היא

$$I_e(\omega) = \hbar\omega r_{21} \approx \hbar\omega Bu(\omega)n_2 \quad ; \quad I_e(\omega) = \hbar\omega r_{12} = \hbar\omega Bu(\omega)n_1$$

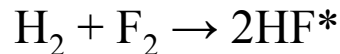
- אם רוצים לקבל פליטה חזקה מבליעה, דורשים  $I_e > I_a$  או  $n_2 > n_1$ , מה שסותר את הפילוג

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp \frac{\hbar\omega}{k_B T}$$

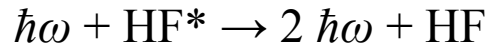
- כלומר, לקבלת פליטה הגוברת על הבליעה, יש צורך ב**היפוך האוכלוסין**. מספר האטומים המעוררים צריך להיות גדול ממספר האטומים ברמת היסוד.

# הליזר הכימי

- בליזר הכימי קל לקבל אטומים מעוררים בעקבות תהליך כימי שבו נוצרת אנרגיה.
- בזמן יצירת האטומים או המולקולות רמת היסוד ריקה לחלוטין ; כולם נוצרים ברמה הגבוהה.
- כך מקבלים באופן טבעי היפוך אוכלוסין מושלם.
- ניתן למשל לקחת מימן ופלוואור ולקבל מהם מולקולה מעוררת (\*)

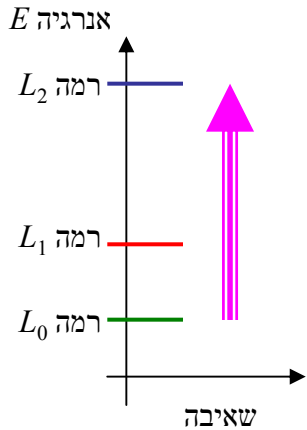


- פוטון פוגע במולקולה המעוררת ומאפשר את המעבר לרמת היסוד הלא-מעוררת, תוך פליטה של עוד פוטון הנמצא במופע אחד עם הפוטון הראשון

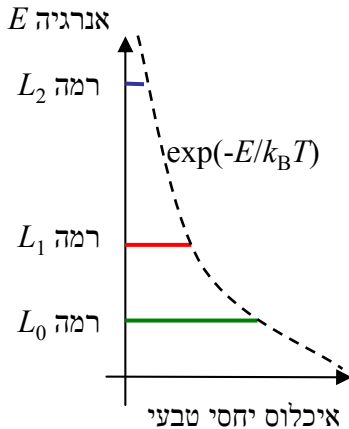


- כעת יש צורך להוסיף עוד מימן ופלוואור לתא ולהוציא מימן פלוואורי לא מעורר ממנו.
- כמובן שהתהליך מסוכן מאוד, ומשתמשים בחומרים יותר קלים לטיפול.

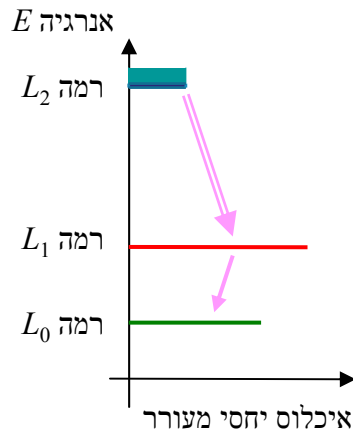
# שאיבה אופטית



- ראינו שבליזר הכימי יצרנו ישירות אטומים מעוררים. לרוב מעלים אטומים לרמה מעוררת בדרכים אחרות. אחת מהן היא השאיבה האופטית.
- **השאיבה האופטית** נוצרת על ידי הארה חזקה של התווך הלוזר, כך שאור נבלע בו ומעלה חלק מהאטומים מרמה נמוכה לרמות גבוהות יותר.
- אם האטום פולט שוב קרינה באורך גל ארוך יותר (או באנרגיה נמוכה יותר) חייב להיות מסלול קרינתי חזרה לרמת היסוד דרך לפחות רמת ביניים אחת.
- תהליך זה נקרא פלואורסצנטי (זוהר) ומאפשר לנו היפוך אוכלוסין. נצייר כללית את התהליך באמצעות חיצים.

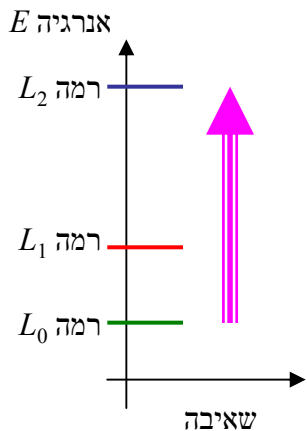


- עובי רמות האנרגיה יחסי לקצב הדעיכה  $1/T$  ועובי החיצים למהירות הדעיכה.
- **זמן הדעיכה** הוא הזמן הממוצע שבו שווה אטום ברמה עד לדעיכה ספונטנית.
- ברמת היסוד זמן הדעיכה אינסופי ולכן עוביה אפסי.





# זמני דעיכה



• נניח שברמה  $L_2$  (העליונה) זמן הדעיכה הוא  $T_2$  וברמת הביניים  $L_1$  זמן הדעיכה  $T_1$ , כאשר  $T_2 < T_1$ .

• אם אורך החיים ברמה מסוימת הוא קצר, אזי איבר המטריצה המקשר בינו ובין רמת האפס הוא גדול: קרינת המשאבה נקלטת ביעילות על ידי האטום.

• ניתן כך לרוקן את רמת היסוד  $L_0$  על ידי ערור לרמה  $L_2$ .

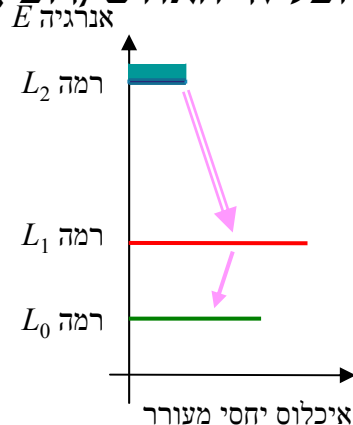
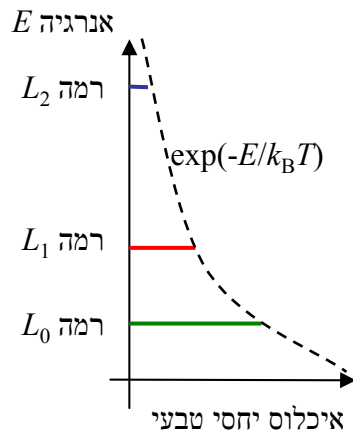
• בגלל אורך החיים הקצר, האטומים יורדים תוך זמן קצר זה לרמת הביניים  $L_1$ .

• ברמת הביניים שאורך החיים שלה  $T_1$  גדול יותר, הם נשארים לזמן רב יותר.

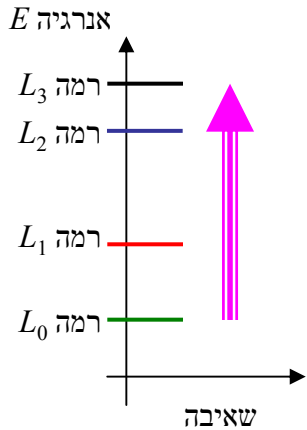
• בעקבות זאת נוצר היפוך אוכלוסין בין שתי הרמות הנמוכות,  $L_0$  ו- $L_1$ .

• היפוך זה דורש גם שרמת היסוד  $L_0$  תהיה לפחות חצי ריקה מן השאיבה.

• תהליך זה אופייני לליזר בסיבים שהוסף להם ארביום ובליזר האודס (רובי).



# רמות נוספות

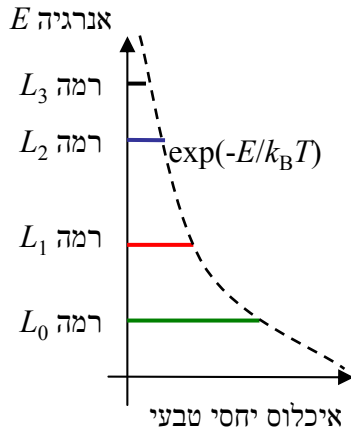


- בדרך כלל אין שלוש רמות כל כך נוחות, וקיימות רמות נוספות הקרובות באנרגיה שלהן לרמות החשובות, מה שגורם לחלק מהאטומים לעבור לשם ולהפחית את היעילות.

- אם נוסיף רמה רביעית, רמת היסוד אינה צריכה להיות מרוקנת עוד.

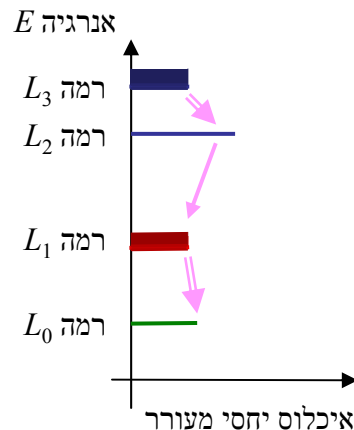
- נוכל לשמור על היפוך האוכלוסין ביעילות רבה יותר.

- כך פועל ליזר נאודימיום-יאג (neodimium-YAG).

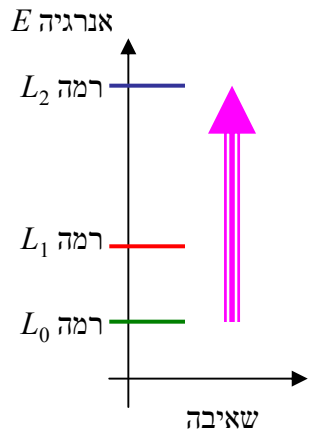


- בנוסף, אורך החיים של הרמה הגבוהה בין שתי הרמות הלוזרות מתקצר כאשר מתחילה הפליטה המאולצת. שיווי המשקל עלול להתערער.

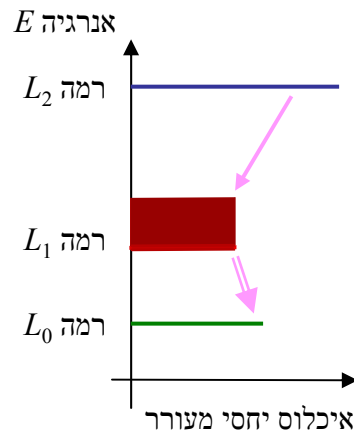
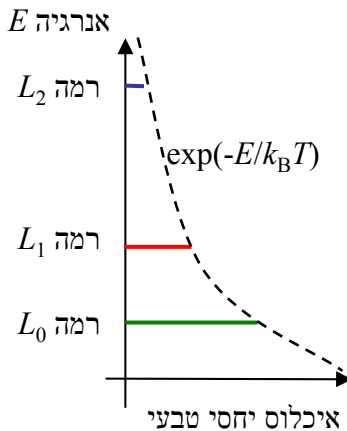
- במקרה כזה נקבל פליטה בהלמים (פולסים).



# ליזרי גז

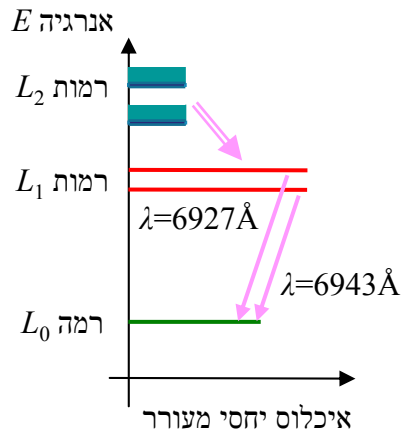


- נניח כעת שברמה  $L_2$  (העליונה) זמן הדעיכה  $T_2$  הוא ארוך ביחס לזמן הדעיכה  $T_1$  ברמת הביניים  $L_1$ , כלומר  $T_2 > T_1$ .
- אם אורך החיים ברמה  $L_1$  הוא קצר, אזי היא מתרוקנת במהירות, ורמה  $L_2$  אינה מספיקה למלא אותה.
- לכן יש יותר אטומים ברמה הגבוהה מאשר ברמת הביניים, והיפוך האוכלוסין קורה בין שתי רמות אלו.
- כעת הליזר יפעל ישירות בזמן שאטומים נשאבים לרמה הגבוהה.
- בגלל שאורך החיים ברמה הגבוהה הוא ארוך, השאיבה האופטית לתוכו אינה יעילה.
- תהליך זה אופייני לליזרי גז כמו יון הארגון, פחמן דו-חמצני והליום-נאון.
- השאיבה נעשית באמצעות **פריקה חשמלית**.



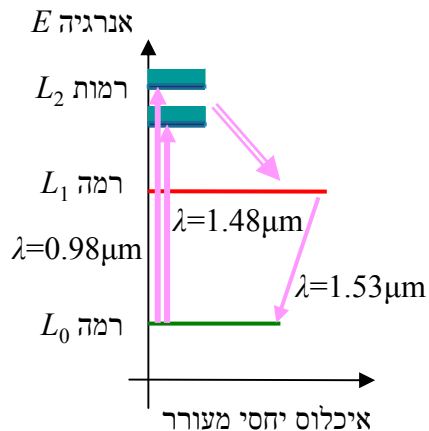
# ליזר האודם

- אודם (רובי) הוא גביש של אלומיניום חמצני ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) עם זיהומים קלים של יוני כרום ( $\text{Cr}^{3+}$ ), המעניקים לו את צבעו האדום.
- ליזר זה, שנבנה על ידי מיימן (Maiman) בשנת 1960 היה הראשון בתחום הנראה.
- רמות הכרום המדולל יוצרות מספר רמות כבציר.
- רמת היסוד צריכה להיות ריקה לפחות עד חציה, ולכן הליזר יחסית לא יעיל.
- השאיבה נעשית על ידי שפופרת קסנון בהבזקים בהספק גבוה, הממוקדת על גביש האודם.



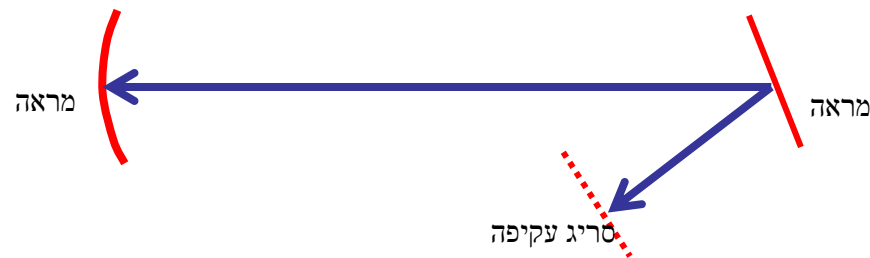
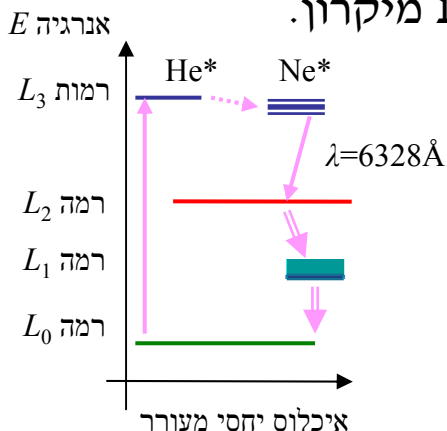
# ליזר הארביום

- ליזר הסיב האופטי המזוהם בארביום משמש כיום לרוב בתקשורת אופטית, בגלל שהוא יוצר אור באורך גל שבו הסיבים שקופים למרחקים ארוכים.
- משתמשים בסבים מסיליקה (תחמוצת סיליקון, כמו זכוכית) שבהם 35 חלקים במיליון של יונים של  $\text{Er}^{3+}$ .
- השאיבה נעשית על ידי דיודת ליזר באורכי גל של 1.48 או 0.98 מיקרון.
- בציור נראות שתי אנרגיות השאיבה החלופיות.
- הסיב האופטי מרכז את הקרינה השואבת והנפלטת בליבה.
- היפוך האוכלוסין גבוה ביותר בגלל הריכוז והפליטה מאוד יעילה.
- במחזור בודד מושגת הגברה רבה, ולכן הסיב משמש כמגבר.
- תוספת של מהוד הופכת אותו לליזר.



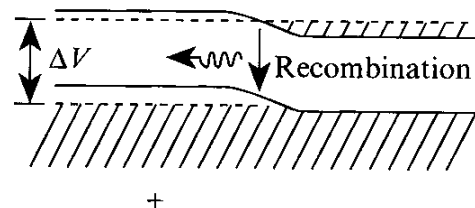
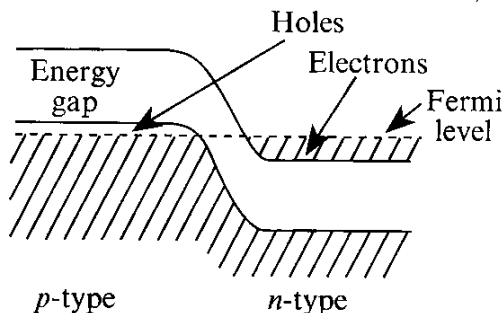
# ליזרי פריקה חשמלית

- משתמשים בתערובת של גזים להשגת היפוך האוכלוסין.
- בליזר הליום-ניאון מביאים את ההליום למצב מעורר על ידי פריקה חשמלית.
- בגלל התנגשויות בין הליום וניאון, אנרגיית העירור עוברת לניאון ברמות אנרגיה קרובות.
- בתהליך מעורבות מספר רמות, אבל רק אחת פולטת באורך הגל של 0.6328 מיקרון. קיים גם קו ירוק שבו משתמשים לעיתים בליזר זה.
- בליזר גזים של פחמן דו-חמצני משתמשים בצורה דומה בחנקן מולקולרי  $N_2$  כדי לעורר את מולקולות ה- $CO_2$ .
- הקרינה נפלטת במספר אורכי גל, לפי מצבי האנרגיה של  $CO_2$  בין 9.5 ו-10.6 מיקרון.
- מהוד אופטי בוחר את אורך גל הקרינה.



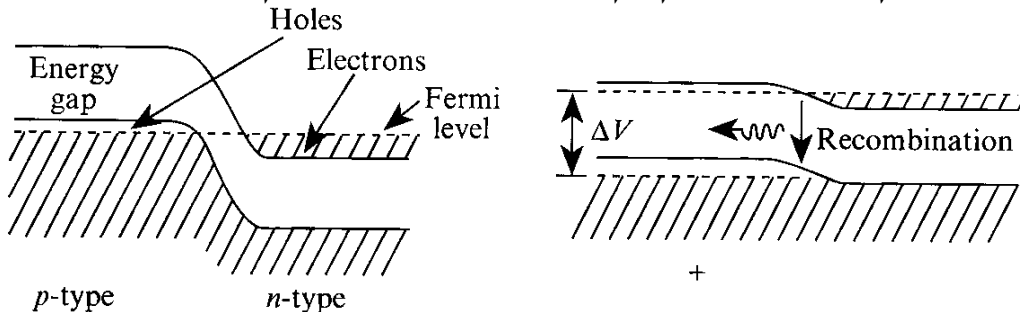
# ליזרי מצב מוצק

- ליזרי מצב מוצק נעשים חשובים יותר ויותר, למשל לתקשורת, ובמרכזם צומת  $p-n$  במתח הפוך.
- כאן רמות האנרגיה הן לא של אטומים או מולקולות אלא של נושאי מטען חופשי בגביש מוליך למחצה.
- נושאי המטען החופשי הם אלקטרונים בפס ההולכה וחורים בשיא פס הערכיות.
- רמות האנרגיה המדויקות שלהם תלויות במיקומן בתוך הצומת, שהוא  $p$  בצד אחד ו- $n$  בצד השני.
- ערכי החיוביות והשליליות ( $p$  ו- $n$ ) נקבעים לפי רמת הזיהום, שהיא לרוב גבוהה מאוד.
- בגלל הזיהום המשמעותי נוצרים אלקטרונים חופשיים בפס ההולכה בצד ה- $n$ , וחורים חופשיים בפס הערכיות של צד ה- $p$ .
- במצב שיווי משקל תרמי מופרדים מרחבית נושאי המטען של שני הצדדים.
- כאשר מוסיפים ממתח הפוך בשיעור  $\Delta V$  מוזזות רמות האנרגיה.
- כעת כדאי אנרגטית לאלקטרונים לנוע לצד החיובי ולחורים לצד השלילי, ולעבור לאזור הצומת.
- באזור זה נוצר היפוך אוכלוסין.



# לזירה בצומת

- מוסיפים ממתח הפוך  $\Delta V$  ורמות האנרגיה מוזזות, לכן נושאי המטען נעים לאזור הצומת.
- באזור זה מצטברות כמויות משמעותיות של חורים ואלקטרונים ונוצר מצב אנרגטי גבוה.
- המצב האנרגטי הנמוך הוא כאשר האלקטרונים ממלאים את החורים ונעלמים, בתוך פחות מננו-שניה.
- תהליך ההתחברות (רקומבינציה) יכול לגרום לפליטת אנרגיה בדרכים שונות.
- כאשר המוליך למחצה הוא מסוג **פער ישיר** (direct-gap semiconductor) נפלטים פוטונים בלבד.
- גבישים מסוג פער ישיר שייכים לרוב לקבוצת V-III וכוללים InSb, InP, GaAs.
- לסיליקון וגרמניום, הנפוצים בתעשייה זו, אין פער ישיר, ועל כן אינם מתאימים לייצור לזרים.
- הזהירה (פלורוסצנסיה) בצומת יוצרת Light Emitting Diode, LED ופולטת ספונטנית בלבד.
- רק בתוך מהוד יש פליטה מאולצת, לאחר מספר החזרות. המהוד מיוצר לרוב על ידי פיצול הגביש.
- אורכי הגל האופייניים קרובים לפער האנרגיה בין פסי ההולכה של הגביש, ונבחרים לפי הצורך.
- משתמשים באורכי גל בנראה או באינפרא אדום הקרוב (1.5 מיקרון) לצורכי תצוגה ותקשורת.





# מהוד הליזר

- במעבר אחד של פוטונים אין עדיין יצירה של קרן קוהרנטית אלא כמה אוספי קבוצות כאלו.

- לכן יש צורך במספר מעברים כדי שקבוצה אחת תשתלט על כל פליטות הפוטונים ותהפוך אותן לקוהרנטיות.

- הדבר שקול למהוד הבנוי ממיקרופון מוגבר ומרמקול הפונים (שלא במתכוון) זה אל זה.

- בתחום תדרי-שמע מסוים יש הגברה של כל צליל הנקלט במיקרופון.

- קיים פיגור בין המיקרופון ובין הרמקול, שנקבע על ידי המרחק ביניהם ומהירות הקול.

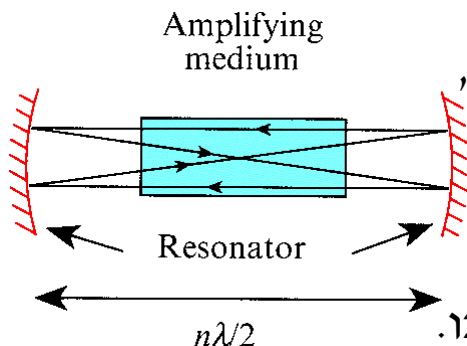
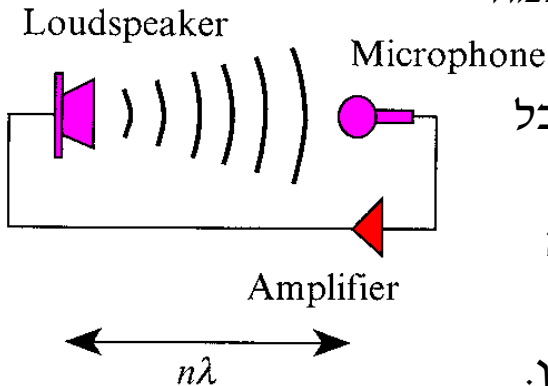
- כאשר הפיגור הוא מספר שלם של אורכי גל קול, מתעוררת תהודה ביניהם ומוגברת על ידי המגבר.

- התדר שבו ההגברה היא בשיאה קובע את צליל ההגברה.

- תהליך דומה מאוד מתחולל בתוך מהוד הליזר. המגבר הוא התווך הלוזר, שבו מוגברים הפוטונים.

- רוחב הפס שלו נקבע על ידי קווי הפליטה, התלויים למשל באורך חיי הרמות, בהרחבות דופלר או התנגשויות.

- המשוב הוא המהוד, והתדרים המדויקים (האופניים) נקבעים על ידי אורכו.

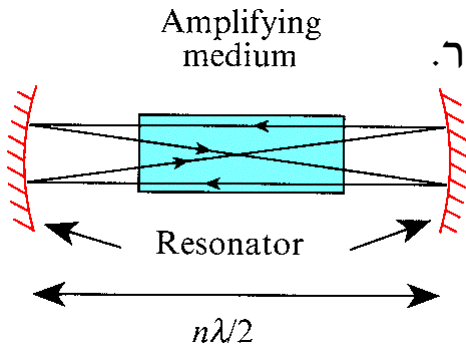


# מהוד הליזר

- המגבר הוא התווך הלוזר, שבו מוגברים הפוטונים. התדר שלו נקבע על ידי תהליך פליטת הפוטונים.

- המשוב הוא המהוד. אופני התנודה נקבעים על ידי אורכו.

- הגבר הליזר נקבע על ידי ההספק של השאיבה והפרמטרים של החומר הלוזר. צמוד להגבר יש הפסדים בתווך הלוזר בגלל בליעה. קיימת גם פליטה ספונטנית.



- במהוד יש הפסדים בגלל אופטיקה לא מושלמת ובגלל הוצאת חלק קטן מהאנרגיה לשימוש חיצוני.

- אופני התנודה האורכיים מקיימים את התנאי שהאורך האופטי של מחזור שלם במהוד יהיה מספר שלם של אורכי גל,

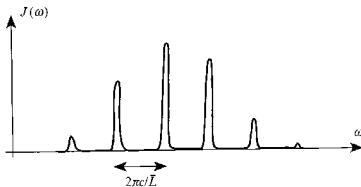
$$L = 2\mu l = n\lambda$$

- ערכו של מקדם השבירה ממוצע על פני המהוד, כולל התווך הלוזר, שעלול להשתנות בגלל חימומו.

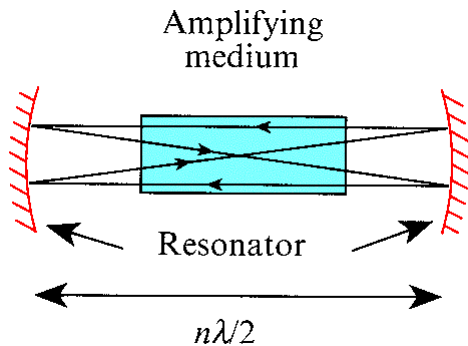
- אורך המהוד גם הוא ממוצע על פני מסלולים שונים.

- תדרי האופנים מופרדים גם הם על פי אורך המהוד הממוצע

$$\Delta\omega = \frac{2\pi c}{L}$$



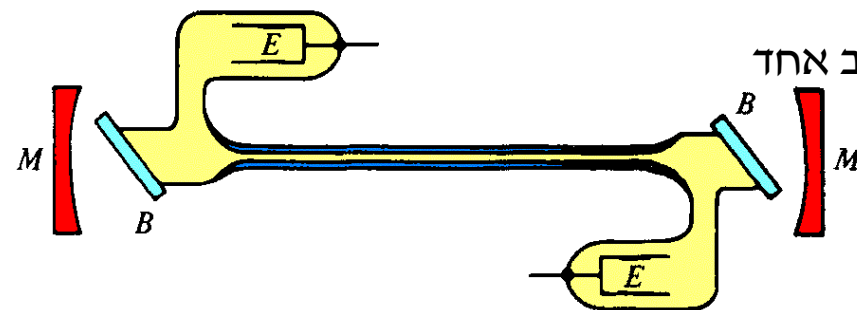
# ליזר רציף ובהלמים



- אורך החיים של רמה  $j$ ,  $T_j$ , תלוי בצורת הדעיכה שלה.
- ניתן לקיים שאיבה מספקת כדי לשמור על היפוך אוכלוסין למרות הפליטה המאולצת. במקרה כזה מקבלים פליטה רציפה – **CW** (continuous wave).
- ייתכן גם שרמה מעוררת תהיה בעלת אורך חיים קצר יותר בזמן אילוץ הפליטה, לעומת אורך החיים הטבעי שלה.
- ייתכן אז שבעת הלזירה לא יתקיים היפוך אוכלוסין והלזירה תיפסק.
- במקרה כזה נקבל ליזר הלמים (**pulsed laser**).
- יש דרכים שונות לשלוט בהלמים, כולל זמן ההתחלה שלהם, סיומם והזמן ביניהם. אלו נקבעים על ידי גורמים פיסיקליים בתוך הלזר ובגורמים חיצוניים.
- שיטה לייצור הלמים סדירים היא **נעילת אופנים** (mode locking).
- נעילת אופנים מתקבלת על ידי הנחתה מכוונת של הקרינה במהוד כל מחזור יחיד, או בהפרש התדרים האופיני של המהוד.
- כך כופים על חבילות גלים מוגדרות בכיוונים הפוכים בתוך המהוד לפלוט ואילו חבילות אחרות מונחתות ולא ממשיכות.

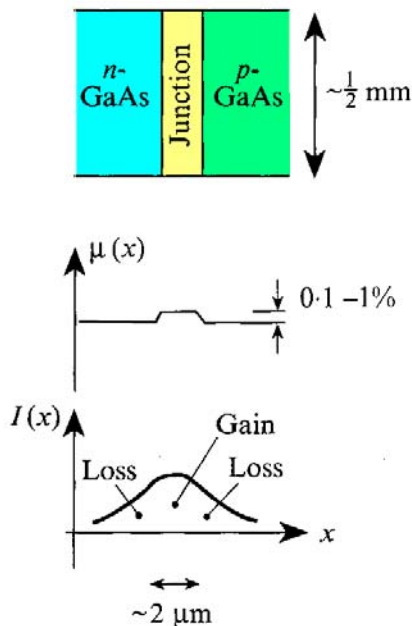
# מבנה ליזר גז

- ליזר הליום-נאון הוא נפוץ ביותר ומשתמש בתערובת של הליום ונאון כדי לשאוב את הראשון כדי שהשני יתפרק וילזור.
- הליזר עשוי שפופרת התפרקות חתומה, שבה דחוסה התערובת He:Ne ביחס 1:10.
- מרכז השפופרת מצוי בדיוק במרכז המהוד האופטי, בנקודת פגישת המוקדים (קונפוקלית).
- אחת המראות מעבירה חלק קטן מן האור, לצריכה חיצונית.
- בגלל ההגבר הנמוך ומספר ההחזרות הגבוה הנדרש, ממזערים את ההחזרות מן החלונות הפנימיים ומגדילים את ההחזרות מן המראות ככל האפשר.
- משתמשים בציפוי רב-שכבתי דיאלקטרי על המראות כדי לכפות החזרה מירבית באורך הגל הרצוי.
- החזרות מן החלונות הסוגרים את השפופרת כמעט לא קיימות בגלל אחת מהסיבות הבאות:
  - החלונות מצופים בציפוי רב-שכבתי דיאלקטרי למניעת החזרות באורך הגל הרלוונטי.
  - החלונות מוטים בזווית ברוסטר (כבציר).
  - החלונות הם חלק המהוד עצמו.
- אם משתמשים בזווית ברוסטר למניעת החזרות, קיטוב אחד יוחזר טוב יותר והקרן היוצאת תהיה מקוטבת.



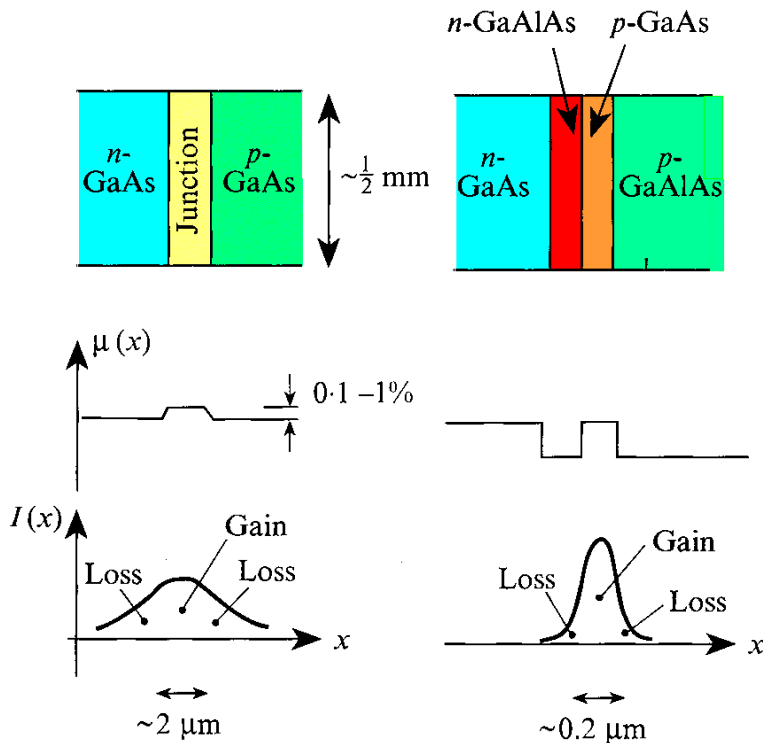
# מבנה ליזר מוליך למחצה

- ליזר מוליך למחצה נפוץ ביותר בתקשורת, וקיימות התפתחויות בלתי פוסקות ביישומו.
- דיודת ליזר רגילה מכילה קוביה של גליום ארסניד בגודל של כחצי מילימטר שבתוכה הצומת  $p-n$ .
- הצומת עצמו בעובי  $d$  של מיקרונים בודדים, בסביבות אורך הגל. לכן  $\lambda / d \approx 0.3$  והקרן מתבדרת.
- חלק גדול מהקרן נבלע בתחום הקרוב לצומת בשני האזורים הלא פעילים הסמוכים ומתבזבז.
- המהוד נוצר על ידי פיצול הגביש בניצב לצומת, ונוצרים שני מישורים מקבילים מדויקים ביותר.
- המהוד הוא בשיווי משקל גבולי. מקדם השבירה של גליום ארסניד הוא גבוה מאוד (בערך 3.6, תלוי באורך הגל) ועל כן ההחזרה טובה מאוד ואין צורך בציפוי נגד החזרות.
- בגלל היעילות הנמוכה הנובעת מן הבליעה מחוץ לצומת, נדרשים לרוב לעבוד בהלמים ולא ברצף.



# ליזר שכבות

- ניתן לשפר משמעותית את היעילות על ידי שימוש בשכבות דקות מחזוריות של חומרים במקדמי שבירה מתחלפים משני צידי קרן האור, לרוב מסוג  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ .
- השכבות הדקות מחזירות את האור פנימה, ממש כמו בסיב, ודואגות לצפיפות קרינה גבוהה בעובי של פחות ממיקרון.
- נוצר מוליך גל שבו מקדם השבירה גבוה יחסית ובו אופני תנודה מרוכזים בצומת.
- מקדם השבירה הגבוה גם קשור לפער אנרגיה אלקטרוני נמוך יותר וכך מגביל את חפיפת האלקטרונים והחורים באזור הפליטה.
- נוצר ליזר מעורב-מבנה (heterostructure laser).



# אור הליזר

- נתבונן בליזר בו מתעורר רק אופן אורכי של התנודה. מספר הפוטונים  $\langle n \rangle$  באופן זה הוא גדול מאוד.
- באור לבן, לעומת זאת, יש פחות מפוטון אחד לאופן (לפחות בתחום הנראה).
- ראינו כבר כי השינוי במספר הפוטונים נתון על ידי  $\delta n = \langle n \rangle^{1/2}$ .
- ניתן להוכיח מעקרון אי הודאות גם כי  $\delta n \delta \varphi \geq 1$ .
- מכאן יוצא כי השוני במופע גם הוא קטן מאוד, עד כדי  $\delta \varphi = \langle n \rangle^{-1/2}$ .
- זהו קו מאפיין של הליזר בניגוד לאור לבן: המופע מוגדר היטב.
- אם הליזר כולל מספר אופנים אורכיים, האור מוגדר היטב בכיוונו.
- כל פיזור ייגרם רק על ידי עקיפה מאזור המתאים לגודלו הפיסי של הליזר.
- קיבלנו את שלושת מאפייני הליזר:

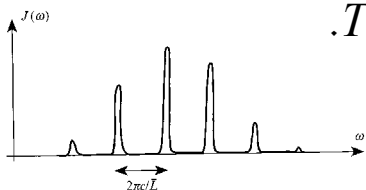
קוהרנטיות המופע

עוצמה גבוהה

כיווניות גבוהה

# פונקצית הקוהרנטיות

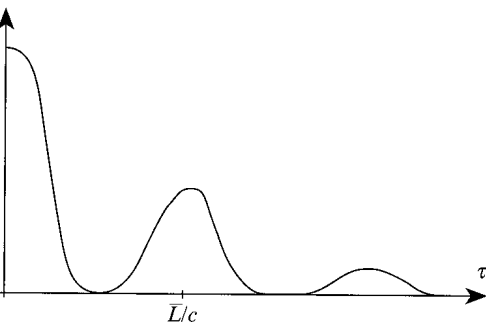
- פונקצית הקוהרנטיות ההדדית היא התמרת פוריה המנורמלת של הפילוג הספקטרי של העוצמה.
- נניח שוב שהליזר פועל רק באופן אורכי אוחד, ואז הספקטרום הוא צר מאוד.
- בגלל תנודות קטנות במופע, הספקטרום אינו פונקצית- $\delta$  מושלמת.



- אורך החיים של תנודות אלו חייב להיות לפחות אורך החיים של מעבר הזיזרה,  $T_l$ .
- לכן זמן הקוהרנטיות חייב לקיים  $\tau_c \geq T_l$ , לרוב פחות ממיקרו-שנייה.
- אורך הקוהרנטיות הוא  $c\tau_c$ , למשל עבור  $T_l = 10^{-7}\text{s}$  נקבל  $c\tau_c \approx 30\text{m}$ .
- לרוב מרחק זה מוגבל יותר בגלל רעידות מכניות, ואורכו כאורך המסלול האופטי בתוך המהוד.

- אם הליזר פועל בכמה אופנים אורכיים בעלי מופעים אקראיים, הספקטרום יהיה כמה קוים בדידים.
- הקוים ספקטריים המופרדים על ידי  $\delta\omega \approx 2\pi c/L$ . פונקצית הקוהרנטיות, או התמרת פוריה שלהם תראה עולה ויורדת.

- אין אורך קוהרנטיות מוגדר לפונקציה כזאת. משתמשים במיקום האפס הראשון ומוצאים שאורך הקוהרנטיות האפקטיבי הוא  $c / (L / 2c) = L / 2$ .



- אורך הקוהרנטיות בליזר הלמים נקבע על ידי אורך ההלם הבודד.
- שטח הקוהרנטיות נובע מגודל המקור, ולכן הוא גודל כתם האור.