

בטיחות השימוש בלייזר במעבדת בית הספר

רמי אריאלי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

תקציר

מכשיר הלייזר משמש למספר רב של הדגמות וניסויים בבית הספר. מורים ותלמידים רבים אינם מודעים לסכנות הכרוכות בשימוש בלייזר, וקיימת מידה רבה של אינפורמציה מוטעית בנושא. מאמר זה מסכם את הסיכונים הכרוכים בשימוש בלייזרים, את האינטראקציה של קרינת לייזר עם רקמה ביולוגית, ואת התקנים הקיימים בעולם לגבי בטיחות השימוש בלייזרים. הלייזר הנפוץ בשימוש בבית הספר (לייזר הליום-נאון בהספק הקטן מ-1mW) אינו מסוכן לשימוש אם מודעים לסיכון הכרוך בפגיעה ישירה של קרינת לייזר זה בעין, ואם מקפידים על כללי זהירות בסיסיים.

מילות מפתח:

בטיחות שימוש בלייזר, תקני בטיחות, לייזר הליום-נאון.

מ-1mW ללא חשש. (הסבר לגבי מגבלת הספק מסוימת זו מופיע בהמשך).

הסכנות הנובעות מהשימוש בלייזר הן שונות ומגוונות, אך בעיקרן הן נוגעות לקרינה הנפלטת מהלייזר.

למעשה גם מחוץ לכותלי המעבדה גדלה מידת השימוש בלייזרים, כגון:

1. "לייזר פוינטר" (Laser Pointer) המשמש למרצה להצגת נקודה על המסך עליו מוקרנת שקופית.
2. סורק הקודים במרכול (Bar Code Scanner).

בעקבות פרסום הצעת הקורס בפיסיקה לבגרות בנושא "לייזרים ויישומיהם"⁽¹⁾, נשאלתי מספר רב של פעמים לגבי בטיחות השימוש בלייזר במעבדת הפיסיקה בבית הספר. במיוחד הובלטה העובדה שכאשר התלמיד מבצע ניסויים עם לייזר אין הדבר דומה לשימוש בלייזר על-ידי המורה לצורכי הדגמה.

בקצרה ניתן לענות על שאלה זו בהצהרה פשוטה: כאשר יש מודעות להבטים השונים הקשורים לבטיחות השימוש בלייזר, וכאשר נוקטים אמצעי זהירות סבירים, ניתן להשתמש בלייזרי הליום-נאון בהספק של פחות

1. כל זמן שהאור מתקדם בתווך הומוגני (כולל אוויר) הוא נע בקו ישר.
2. כאשר אלומת אור פוגעת במשטח גבול בין שני תווכים, מסלולה יכול להשתנות כתוצאה מהשפעת אחת משתי התופעות:

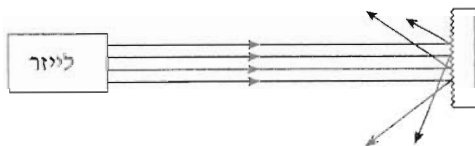
א. **החזרה** - אלומת הקרינה יכולה להיות מוחזרת באחת משתי הדרכים:

1. **החזרה ספקולרית (מסודרת)** - כמו ממראה או ממשטח מבריק אחר. במקרה זה מתקיים **חוק ההחזרה**, כלומר זווית הפגיעה של אלומת האור במשטח שווה לזווית החזרתה מהמשטח (תרשים 1).



תרשים 1: החזרה ספקולרית

2. **החזרה דיפוזיבית (מפוזרת)** - בה האור הפוגע מתפזר לכל הכיוונים ומאבד את תכונות האלומה הכיוונית. ברור כי בהחזרה דיפוזיבית קטנה צפיפות ההספק של האור המוחזר, ופוחתת רמת הסיכון בהתאם. (תרשים 2).



תרשים 2: החזרה דיפוזיבית

- ב. **שבירה** - כאשר אלומת קרני האור פוגעות בתווך שקוף בעל מקדם שבירה שונה, כיוונה משתנה בהתאם **לחוק סנל**:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

תהליך זה הוא האחראי לתהליך מיקוד האור בעדשות, או לשינוי מסלול האור במעברו במינסרות (פריזמות).

בשלב לימוד האופטיקה הגיאומטרית יש להדגיש בפני התלמידים את ההשלכות הנובעות מתהליכים אלו על בטיחות העבודה עם לייזרים.

בארה"ב ובאירופה נקבעו תקנים מחמירים לגבי בטיחות השימוש בלייזרים. הלייזרים חולקו לקבוצות לפי אורכי הגל הנפלטים מהם, ולפי אפיוני הקרינה הנפלטת: הספק הקרינה, משך פולס, וכו'. תקנים אלו מתעדכנים מידי פעם בהתאם למחקרים ולתגליות בתחום הלייזרים, ובהתאם לידע הנלמד על האינטראקציה של קרינת הלייזר עם הריקמה הביולוגית. לכן, מומלץ שלכל אחד תהיה מודעות לסכנות הקשורות בשימוש במכשיר הלייזר.

בנוסף לקרינה הנפלטת מהלייזר, קיימת לכאורה גם **סכנת התחשמלות** בלייזר מכיוון שספק הלייזר מספק מתחים גבוהים. אולם, גם במכשיר הטלוויזיה הביתי קיימים מתחים גבוהים, ולא שמענו על איסור השימוש בטלוויזיה מחשש התחשמלות. הלייזר המשמש במעבדת בית הספר ארוז בתוך קופסת מתכת, ואין שום סיבה הגיונית לפתוח אותה כאשר הלייזר מחובר לרשת החשמל.

המודעות ללייזר ולסכנותיו היא האמצעי העיקרי למניעת תאונות העלולות להיגרם מהשימוש בו. לפני תחילת העבודה בלייזר יש להקפיד על **סימון מתאים (שילוט)**, **והסבר לכל המצויים בחדר בו משתמשים בלייזר**.

הנזק העיקרי העלול להיגרם כתוצאה מהשימוש בלייזר הליום-נאון בהספק נמוך הוא **לעיניים** ולכך מוקדש עיקר ההסבר שיובא כאן.

לא תמיד מורגש הנזק על-ידי האדם לו נגרם הנזק. לעיתים הנזק הוא מזערי, ומצטבר על פני תקופה ארוכה. נזק מצטבר לעיניים יכול לגלות רופא עיניים בבדיקה עם אופטלמוסקופ. ואכן משתמשי לייזר במשך תקופה ארוכה (כגון עובדים במפעל ללייזרים) מחוייבים בבדיקת עיניים מסוג זה אחת לשנה.

הקרינה הנפלטת מהלייזר היא **קרינה אלקטרומגנטית** שהתכונות העיקריות המבדילות אותה מאור "רגיל" הן:

1. **מונוכרומטיות**.
2. **עוצמה גבוהה ליחידת שטח** הנובעת מזווית התבדרות נמוכה של אלומת הקרינה הנפלטת מהלייזר. אלומת הלייזר היא כמעט אלומה מקבילה בתחום המרחקים במעבדה.
3. **קוהרנטיות** - לא ידוע על השפעה מיוחדת על ריקמה ביולוגית כתוצאה מתכונה זו.

לשם מניעה של פגיעת קרינת הלייזר בעין יש להבין את **הגורמים המשפיעים על מהלך קרני האור**:

השפעת קרינת לייזר על ריקמה ביולוגית

ראשית יש לחזור ולהדגיש:

1. **קרינת הלייזר היא קרינה אלקטרומגנטית**, ואין לבלבל אותה עם קרינה רדיואקטיבית. בנוסף לכך, לאורכי הגל של הלייזרים בתחום הנראה והאינפרא אדום הקרוב, אין כל השפעה מייננת כפי שיש לקרינה אלקטרומגנטית באורך גל קצר, כגון קרני X או קרני γ .
2. קרינת הלייזר הפוגעת בריקמה ביולוגית עוברת אחד משלושת התהליכים: החזרה, העברה ובליעה. העוצמה היחסית של כל אחד מתהליכים אלו תלויה בתכונות קרינת הלייזר ובתכונות הריקמה הביולוגית. התהליך המשפיע על הנזק שייגרם לריקמה הביולוגית הוא **תהליך הבליעה**.

קרינת לייזר הנבלעת בריקמה ביולוגית יכולה להשפיע במספר מנגנונים:

1. **אפקטים תרמיים** - הקרינה הפוגעת גורמת למולקולות להתנוודד ונוצר חום בריקמה. הנזק הנגרם לריקמה מתחיל בקרישת החלבונים, ויכול להגיע לשריפה של הריקמה.
2. **אפקטים תרמו-אקוסטיים** - בעיקר כאשר קרינת הלייזר מרוכזת בפולסים קצרים (פחות ממיליונית השניה - μs) בעלי עוצמה גבוהה. התהליך השולט הוא צפיפות הספק **ריגועית** גבוהה ביותר, הגורמת לעליית טמפרטורה **מקומית** גבוהה. כתוצאה מכך הופך הנוזל בריקמה לגז, ועקב הגדלת הנפח הכרוכה בכך, נקרעת מעטפת התאים בתהליך של פיצוץ.
3. **אפקטים פוטוכימיים** - כאשר אורך הגל של קרינת הלייזר מתאים לעירור ריאקציות בין מולקולות אורגניות מסויימות. בשנים האחרונות נתגלו הוכחות להיווצרות שינויים בלתי הפיכים בריקמה הביולוגית עקב חשיפה ממושכת לרמות קרינה נמוכות.

פגיעת קרינת לייזר בעין

העין בנויה לקליטה של קרינת אור, ולכן היא שקופה לתחום הספקטרום הנראה וגם לתחום האינפרא-אדום הקרוב. מנגנון העין משמש מגבר הממקד את הקרינה הפוגעת ביחס שבין גודל האישון לגודל הכתם הנוצר על הרישתית. יחס הגברה זה יכול להגיע במקרה הגרוע ביותר להגברה של פי מיליון (10^6). פגיעת קרינת לייזר בהספקים של מיליוואט בעין יכולה לגרום למיקוד צפיפות הספק לכדי מאות קילוואט למילימטר מרובע. כתוצאה מכך נשרפות נקודות על הרישתית, והתהליך יכול להסתיים בעיוורון!

למעשה, יש הטוענים כי קוטר הכתם הנוצר על הרישתית אינו של מספר מיקרונים אלא של עשרות מיקרונים, עקב רעידות העין בתדר 30-80Hz. למרות זאת יש להקפיד על **כללי הזהירות הבאים בעבודה עם לייזרים במעבדת בית הספר**:

1. להסביר לתלמידים ולמורים את הסכנות של קרינת הלייזר!
2. להימנע מהסתכלות ישירה אל תוך אלומת קרינת הלייזר!
3. להרחיק חפצים מחזירי אור ממסלול אלומת הלייזר, כדי לא להטות את האלומה ממסלולה לכיוון בלתי רצוי. גם טבעת זהב על אצבע במסלול הקרן, עלולה להטותה לעין!!
4. להשתמש בשילוט מתאים המתריע על הפעלת לייזר.
5. להימנע לחלוטין מפתיחת הקופסא בה מצוי מכשיר הלייזר כאשר הוא מחובר למקור מתח.

חלוקת הלייזרים לקבוצות לפי מידת הסיכון הכרוכה בשימוש בהם

משרד הבריאות האמריקאי, ובמקביל גם וועדת הפיקוח הבינלאומית על תקנים, חילקו את הלייזרים הקיימים לקבוצות לפי מידת הסיכון הכרוכה בשימוש בהם. החלוקה היא ל-4 קבוצות עיקריות:

1. **קבוצה 1** - כוללת את כל הלייזרים אשר בתנאי עבודה רגילים אינם יכולים לגרום לפליטת קרינה המסוגלת לגרום נזק. למעשה מוגדרת קבוצה זו על-ידי השם הכולל: **לייזרים בטוחים לעין ("Eye-safe lasers")**. לייזר מסוג זה לא יגרום כל נזק לאדם המסתכל במשך 8 שעות רצופות ($3 \cdot 10^4 s$) ישירות לתוך קרינת הלייזר, זאת ללא תלות באורך הגל הנפלט מהלייזר. לדוגמא: עבור לייזרי הליום-נאון נקבעה רמת ההספק לקבוצה זו כ- $0.4 \mu W$!
2. **קבוצה 2** - כוללת את **כל הלייזרים הפולטים קרינה בתחום הנראה** (אורכי גל בתחום: $0.4-0.7 \mu m$). כאשר זמן החשיפה לקרינה קטן מ-0.25 שניות אין הם מסוכנים יותר מהלייזרים של קבוצה 1. זמן זה הוא זמן ממוצע של רפלקס סגירת האישון של העין באדם ממוצע. ההספק המכסימלי של לייזר הליום נאון רציף המותר בקבוצה זו הוא $1 mW$, ומכאן המגבלה המיידית עבור לייזר למעבדת בית הספר. כל לייזר שקרינתו אינה בתחום הספקטרום הנראה (אינו מפעיל את רפלקס סגירת האישון), ופולט מעל הרמה המסווגת בקבוצה 1, נכלל אוטומטית בקבוצה 3.

3. קבוצה 3 - מחולקת לשתי תת-קבוצות:

קבוצה 3a - כוללת את הלייזרים הפולטים **קרינה בתחום הנראה** ברמה שאינה פוגעת באדם אשר תגובת רפלקס סגירת האישון שלו תקינה. אדם המשתמש במיכשור (כגון משקפת או טלסקופ) לראיית אלומת הקרינה, עלול להיפגע ממנה. מומלץ השימוש במשקפי מגן בעת העבודה עם לייזרים מקבוצה זו!

קבוצה 3b - בקבוצה זו נכללים כל הלייזרים הפולטים קרינה באורך גל כלשהו המסוגלת לגרום נזק לעין של צופה אשר אינו מצוייד באמצעי ראייה נוספים.

ההספק המכסימלי של לייזרים מקבוצה זו הוא 0.5W.

4. קבוצה 4 - בקבוצה זו נכללים כל יתר הלייזרים הפולטים קרינה היכולה לפגוע בעיניים לא רק על-ידי פגיעה ישירה, אלא גם באמצעות החזרה דיפוזיבית. כמו כן נכללים בקבוצה זו לייזרים היכולים לפגוע לא רק בעיניים אלא גם בעור, וכן לייזרים שקרינתם עלולה לגרום להצתה (שריפה).

כל לייזר שהספקו מעל 0.5W נכלל הקבוצה זו. חלוקה זו מבוססת על מקסימום הקרינה הנפלטת מהלייזר ועלולה לגרום לנזק. לשם כך מגדירים את **המיפתח דרכו נקלטת הקרינה, והמרחק מהלייזר** בו

מודדים את הספק הלייזר העובר דרך מיפתח זה. עבור קרינה בתחום הספקטרום הנראה ובתחום הספקטרום האינפרא-אדום הקרוב מיפתח זה **מוגדר כ-7 מילימטר (קוטר מכסימלי של אישון העין אצל צעיר)**.

עבור לייזרים שקרינתם בתחום האולטרא-סגול או האינפרא-אדום הרחוק, המיפתח מוגדר כ-1 מילימטר. כאשר משתמשים במערכת אופטית כגון משקפת, המיפתח מוגדר כ-50 מילימטר.

העידכון אחרון של מכון התקנים האמריקאי:
American National Standards Institute
בוצע בשנת 1993 ונקרא:
ANSI Z136.1

בשלב זה עיקר השימוש בבית הספר הוא **בלייזרים מסוג הליום - נאון בהספק של עד 1mW** (2). לייזרים אלו שייכים לקבוצה 2. בשימוש בלייזרים מקבוצה זו, אין צורך בהרכבת משקפי מגן למשתמשים, אולם יש להימנע מהסתכלות ישירה לתוך אלומת הלייזר, ויש צורך בשילוט מתאים ובהסבר של כללי בטיחות.

דוגמאות לשילוט תיקני המתריע על קרינת לייזר מופיעות בתצלומים הבאים:



ביבליוגרפיה

1. "לייזרים ויישומיהם" -הצעת קורס בחירה בפיסיקה לרמה של 5 יחידות לימוד לבגרות, ר. אריאלי, "תהודה" כרך 15, חוברת 2, עמ' 58-61, 1993.
2. "רכישת לייזר למעבדת בית הספר", ר. אריאלי, "תהודה" כרך 15, חוברת 2, עמ' 64-66, 1993.

תהודה