

## הצעה לביצוע שני ניסויים באלקטרוסטטיקה\*

אברהם אלק, קיבוץ העוטף

### הניסוי

נקח מוט מוליך ונסובב אותו (ונמשיך לסובב אותו) במישור אנכי מסביב לציר אופקי הניצב למוט. ננסה למדוד או לפחות לגלות את הזרם הזורם במוט.

באופן מעשי ניתן לבנות את המתקן בצורה הבאה: במקום מוט מוליך נקח מוט עץ או פלסטיק, אשר לאורכו נחזק תייל מוליך; אמצע התייל יהיה מופסק ויחובר בו אינדיקטור או מכשיר מדידה. לקצה המוליך משני הצדדים נחבר מוליכים מורחבים יותר, כעין חצאי כדורים, כדי לתת לקצוות האלה קיבול גדול יותר מאשר יש לקצות התייל בלבד.

לקבלת הערכה של סדרי גודל נניח:

1. אורך המוט הוא כ-3 מטר.
2. הקטרים של חצאי הכדורים הם כ-30 סנטימטר.
3. האינדיקטור - נורית ניאון קטנה.

נסובב את המוט ביד במהירות רבה ככל שנוכל.

הערכה של סדרי גודל מראה כי הזרם שיזרום בתייל קטן בערך בשני סדרי גודל מכדי לגרום לנורית להבהב. על כן עלינו למצוא אינדיקטור רגיש יותר מנורית הניאון. ניתן להגדיל את רגישות המדידה כאשר במקום נורית הניאון לוקחים מגבר עם כניסה בעלת עכבה גבוהה (לדוגמא: FET 3N128), ראה תרשים 2. את הקצוות אשר באמצע החוט נחבר בעזרת מגע מחליק (פחיות וטבעות כמו במנועים - "מברשות") אל המגבר הרגיש.

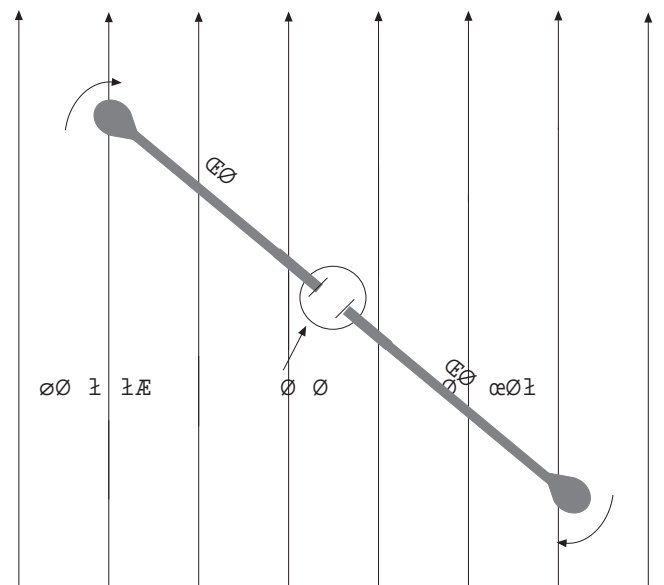
כך נוכל להוכיח בקיום השדה ובעזרת כיוול מתאים נוכל אף למדוד אותו. \*\* אם נצליח בזה, נוכל בודאי להקטין את גודל המתקן לממדים נוחים.

### ניסוי 1: השדה אלקטרוסטטי באטמוספירה

#### מבוא

סיבוב מוט מוליך בתוך שדה אלקטרוסטטי אחיד במישור מקביל לשדה (ציר הסיבוב מאונך לשדה), גורם לזרימת זרם חילופין במוט. גם כאשר מהירות הסיבוב גבוהה, זרם זה אינו בהכרח סינוסואידי, אולם צורתו תתקרב לצורת סינוס כאשר זמן מחזור הסיבוב קצר מאוד לעומת קבוע הזמן RC של המוט. גם כאשר קיים אלמנט לא ליניארי במעגל בו זורם הזרם לא תיווצר צורת הסינוס.

ניתן להשתמש בשיטה זו כדי להראות את קיומו של השדה החשמלי הקיים על פני כדור הארץ. (כפי שהמצפן משמש כדי להראות את קיומו של השדה המגנטי של כדור הארץ). כידוע, בשטח גלוי - גרדיאנט הפוטנציאל החשמלי באטמוספירה מכוון כלפי מעלה וערכו כ-100 volt/meter.



תרשים 1

#### הערות המערכת

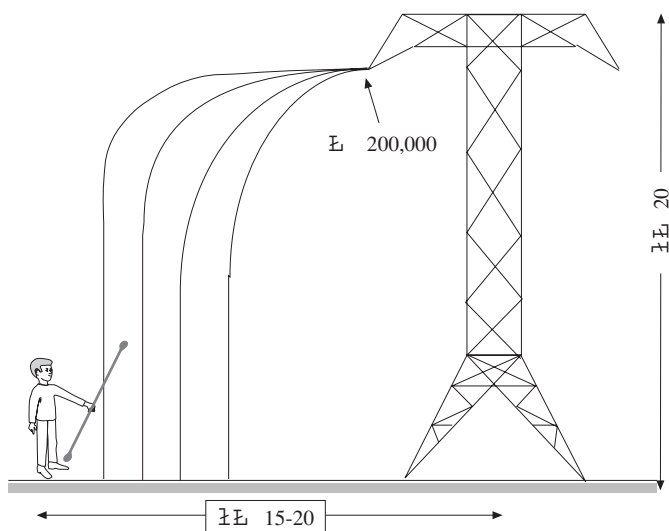
\* מחבר המאמר ביצע חלק מניסויים אלה בעבר, וחלקם הוא מציע למעוניינים כרעיונות חדשניים לביצוע עצמי.  
\*\* כיום ניתן להשתמש במכשירי מדידה רגישים המודדים זרמים של מאות פיקואמפרים (לדוגמא Unilab מודל 017.020) למדידה ישירה של זרמים אלו.

באמצעות נורית ניאון ובקצוותיו שני דגלי ניר אלומיניום בגודל של 6x6 ס"מ רבוע.  
 ב. מגבר עם כניסת FET3N128 בעל עכבת כניסה גבוהה.

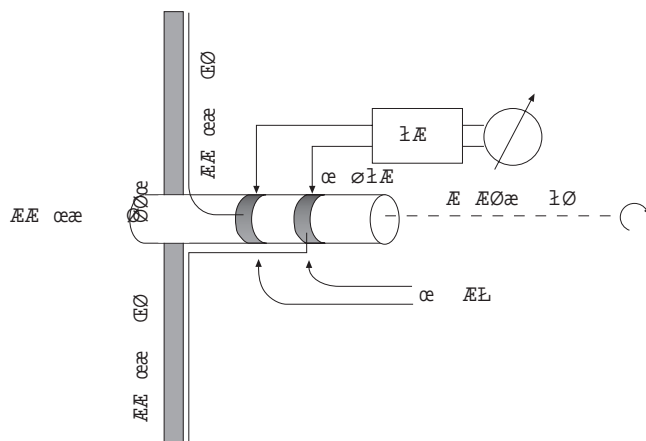
### הפעלה:

המערכת המתוארת מאפשרת חקירה של השדה החשמלי באזור קרוב לקווי של "מתח גבוה מאוד" של חברת החשמל. במרחק של 15-20 מטר הצידה מן ה"קווי" - הנורית דולקת באופן קבוע, כאשר המוט נמצא בכיוון השדה. מכשיר זה מאפשר למצוא מייד את כיוון השדה. ברגע הראשון הופתעתי כשראיתי כי שדה מכסימלי לא התקבל כאשר מכוונים את המוט אל החוטים, אלא בכיוון אנכי. כמוכן המוט צדק, השדה בקרבת הקרקע ניצב לקרקע, כי פני האדמה מבחינה זאת מהווים משטח שווה-פוטנציאל. כשהמוט ניצב לשדה, זאת אומרת, מקביל לקרקע, הנורית כבה לגמרי; היא מתחילה להאיר כשמשנים את כיוון המוט (במקרה של הניסוי שלי כשהרמתי אותו בזווית של כ 30 מעלות).

הפרש הפוטנציאלים בין קווי מתח גבוה מאוד והקרקע הוא כ- 200,000 וולט, אולם להערכת השדה ממוסך במידה רבה ע"י קו הארקה בגובה. כלומר, בהתחשב בגובה הפיזי של הקווים, השדה בגובה הקרקע הוא פחות מ 10,000 וולט למטר. הנורית דלקה עם הרמה לזווית של 30 מעלות, כלומר פחות מ 5,000 וולט למטר, תדירות זרם החילופין 50 הרץ לשניה. מהניסוי המתואר ניתן לקבל מושג על רגישות מתקן המדידה.



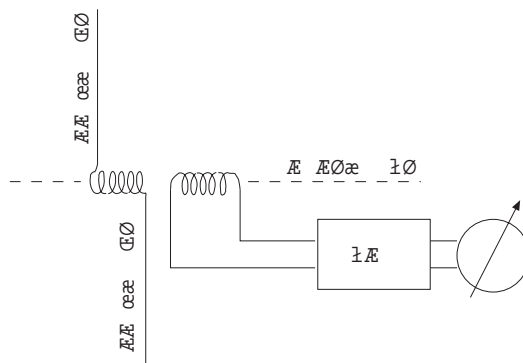
תרשים 4



תרשים 2

### הצעה לשיפור נוסף:

באמצע התייל נחבר סליל קטן, בו יזרום הזרם הנבדק (ראה תרשים 3), את הזרם הזורם בסליל נוכל למדוד באופן אינדוקטיבי על-ידי סליל ניח הנמצא מול הסליל המסתובב עם התייל. הסליל הניח יחובר למגבר וכ'...



תרשים 3

בנסויים בשיטה דומה, אך פחות יעילה מן המוצע כאן, שביצעתי לפני מספר שנים, התרשמתי כי הניסוי יכול להצליח בשטח פתוח. הניסוי צריך להתבצע במקום בו המרחק מן המבנים (גם עצים או עמודים) גדול מגובה העצמים, כלומר מחוץ ל"אזור הצל" של 45 מעלות בערך. את הפרויקט אני משאיר לאלה אשר ישקיעו מאמצים בביצועו, אבל לשם אוריינטציה אדווח כאן על כמה ניסויים מקדימים:

### המכשיר:

א. מוט באורך של כ 160 ס"מ. לאורכו תייל מסוכך אשר

## ניסוי 2: הדגמה של קווי כוח אלקטרוסטטיים

בשעורי הפיסיקה רגילים להדגים "קווי כוח" מגנטיים, אבל בדרך כלל אין מדגימים קווי כוח אלקטרוסטטיים, למרות שניתן לבצע זאת בצורה יפה, גם בשלושה מימדים.

### האמצעים:

סיבי זכוכית דקים וישרים (מהם עושים את הפיברגלס). זהו שיפור משמעותי לעומת חוטי הטכסטיל בהם השתמשו להדגמות בעבר.

### הוראות בטיחות:

חובה לעבוד עם משקפי מגן ואסור לשאוף את סיבי הזכוכית לריאות!!

## ביצוע (מומלץ רק בתור הדגמה)

רצוי מאוד לדאוג לתאורה מתאימה. (הסיבים מבריקים ומנורת שולחן יכולה להיות אפקטיבית מאוד).  
אורך הסיבים הרצוי לנסוי: מ 2 עד 8 ס"מ בערך - מעורבים. מפזרים אותם למשל מעל כדורים טעונים. הסיבים, חלקם במעוף, חלקם בעמידה, בודדים או בהוותם חוטים דבוקים - מתארים היטב את קוי הכח החשמליים.

הכותב מזמין קוראים המעוניינים בביצוע רעיונות אלו לפנות אליו לקבלת פרטים והסברים נוספים.

# רכישת לייזר למעבדת בית הספר

רמי ארילי, המחלקה להוראת המדעים, מכון וייזמן למדע

לפני רכישת לייזר יש לבחון מהם השימושים להם מיועד הלייזר, ועל פיהם לבחור את הפרמטרים החשובים שינחו את השיקולים בבחירת הלייזר המסויים מתוך המיגוון העצום המצוי בשוק.

### פרמטרים חשובים:

1. הספק יציאה - הספק הקרינה האלקטרומגנטית הנפלטת מהלייזר. יש לבחון הספק זה משני היבטים מנוגדים:  
א. הספק שיתאים לביצוע המשימות הנדרשות, ומכאן שהשאיפה היא להספק גדול ככל הניתן.  
ב. הספק שלא יהווה סיכון בטיחותי, ומכאן הדרישה להספק נמוך ככל האפשר.

רוב הלייזרים מסוג הליום-נאון המשמשים להדגמות במעבדה לפיסיקה הם בעלי הספק שאינו עולה על 1mW. עובדה זו נקבעת על פי סיווג הבטיחות המקובל בעולם:

כל הלייזרים עד להספק של 1mW נכללים בהגדרת Class II, שהיא הדרגה הראשונה (הנמוכה ביותר) של סיכון בעבודה בלייזרים. חייבים להקפיד ולמנוע פגיעת קרינת לייזר מדרגה זו ישירות בעין, אך אין סיכון בהסתכלות בקרינה המוחזרת בצורה מפורזת.

למרות שהלייזר הינו מכשיר המופיע יותר ויותר בחיי היום יום, עדיין לא ברור "כיצד רוכשים מכשיר לייזר". כדי לענות על צורך זה חיפשתי ב-"דפי זהב" של איזור ת"א והמרכז משנת 1993 תחת הנושא "לייזר" - ולא מצאתי כלום! גם בחיפוש תחת הנושא "מעבדות" - ציוד ומכשירים" לא מצאתי איזכור לנושא הלייזרים.

האם פירוש הדבר ש"אין דבר כזה" או שעדיין אין מודעות בציבור למכשיר זה?

הלייזר משמש כמכשיר כמעט אידיאלי להדגמה של תופעות פיסיקליות רבות. כיום, עיקר השימוש בלייזר במעבדת הפיסיקה בבית הספר הוא להדגמות מ-2 סוגים:

1. באופטיקה גיאומטרית - להדגמת תופעות של החזרה, שבירה, החזרה שלמה, מיקוד וכו'.
  2. באופטיקה פיסיקלית - להדגמת עקיפה בסדק יחיד ובחריץ, התאבכות בשני סדקים ובשריג, וכו'.
- מספר היישומים של הלייזר במעבדת הפיסיקה גדל בקצב מהיר (ראה המאמר "לייזרים ויישומיהם" בחוברת זו), ולכן לוקט מידע רלבנטי לנוחיות המורה המתכנן רכישת מכשיר לייזר למעבדת בית הספר.

הלייזר הנפוץ ביותר (למעשה כמעט ניתן לומר - היחיד), בשימוש במעבדת הפיסיקה בבית הספר הוא לייזר מסוג הליום-נאון (He-Ne). לייזר זה פולט קרינה באורך גל של 632.8nm (אור אדום).

2. איכות האלומה הנפלטת מהלייזר:

2.1 מספר אופני התנודה של הלייזר:

אלומת הקרינה הנפלטת מהלייזר יכולה להיות בעלת דרגת קוהרנטיות גבוהה - כאשר הלייזר פועל באופן תנודה אחד (Single Mode). תכונה זו חשובה לניסויי התאבכות ובעיקר להולוגרפיה. מלייזר הפועל במספר אופני תנודה ניתן לקבל הספק קרינה גבוה יותר במחיר זול בהרבה.

2.2 התבדרות האלומה הנפלטת מהלייזר - הפתיחה הזוויתית של מעטפת אלומת הקרינה הנפלטת מהלייזר נמדדת ביחידות מיליראדיאן (mrad). רוב הלייזרים מסוג הליום-נאון הם בעלי התבדרות זוויתית שאינה עולה על 2mrad, כלומר, אם גודל כתם האור ביציאה מהלייזר הוא 1-2mm, הרי במרחק 2 מטרים מהלייזר יגדל גודל כתם האור ל- 5-6mm. לרוב היישומים המקובלים היום בהדגמות אין חשיבות לכך.

3. קיטוב:

קרינת הלייזר יכולה להיות מקוטבת לינארית או בלתי מקוטבת. לניסויים מסויימים באופטיקה פיסיקלית נדרשת קרינה מקוטבת, ולאחרים קרינה בלתי מקוטבת. מומלץ לרכוש לייזר שקרינתו בלתי מקוטבת, ולהשתמש במקטב חיצוני במידת הצורך.

4. תכונות מיוחדות:

לניסויים מיוחדים נדרשים אורך קוהרנטיות ארוך ויציבות תדר גבוהה. מושגים אלו ודומיהם מוסברים בקורס על לייזרים ויישומיהם (ראה חוברת זו עמוד 58). רק לאותן מעבדות אשר לגביהן מתוכנן להכניס בעתיד ניסויים מתוחכמים אלו יש לשקול רכישת לייזר בעל תכונות מיוחדות, אלא שמומלץ להמתין עם הרכישה עד לאחר השתלמות בנושא.

מסקנות

עבור רוב היישומים הנדרשים במעבדת הפיסיקה בבית הספר התיכון מתאים לייזר מסוג הליום-נאון מהמודלים הפשוטים ביותר (מחירו בחו"ל כ-\$200). לייזרים אלו אפשר לרכוש בין היתר באמצעות היבואנים של ציוד אופטי המפורטים בטבלה 1.

חברת ייבוא	חברה מייצרת	שם הסוכן	טלפון	כתובת הסוכן
אי-אי-אס	AEROTECH	יוסף שפיץ	03-7526333	ת.ד. 20280 ת"א 61202.
אמו הנדסה	MELLES GRIOT	דוד פולג	03-453157	פינקס 40 ת"א.
ניו טכנולוגי	UNIPHASE SPECTRA-PHYSICS	רמי קרניאל	03-324181	הלי"ה 19, גבעתיים 53402.
ראש אלקטרואופטיקה	SIEMENS	אפריים רובין	053-620605 053-627401	ת.ד. 2248 רח' הס 6, נתניה.

טבלה 1

לצורך השוואה כיצד משתנה מחירו של לייזר הליום-נאון ביחס לדרישות ממנו, מצורף בטבלה 2 החלק הרלבנטי ממחירון חברת Uniphase בארה"ב.

הערות	מחיר [\$]	התבדרות זוויתית [mrad]	מקוטב	הספק [mW]
ספק מחובר ללייזר	215	1.7	לא	0.5
ספק מחובר ללייזר	250	1.7	כן	0.5
ספק נפרד מהלייזר	530	1.7	לא	0.5
ספק נפרד מהלייזר	590	1.7	כן	0.5
ספק נפרד מהלייזר	600	1.7	לא	0.8
ספק נפרד מהלייזר	665	1.7	כן	0.8
ספק מחובר ללייזר	235	1.7	לא	1.0
ספק מחובר ללייזר	275	1.7	כן	1.0

טבלה 2

★ קיימים לייזרים של חברת מטרוֹלוגיק (Metrologic), אך הם פועלים במתח של 110 וולט (יש צורך בשנאי נוסף), ומחיריהם מעל \$340.

★ מחיר לייזר הליום-נאון מיוצב תדר לשימושים מיוחדים יכול להגיע ל-\$4,000 !!! מחיר לייזר הליום נאון הפולט קרינה בתחום ספקטרום האור הירוק (כן, יש כאלה!) - \$800 ויותר.

### הערה

ניתן גם לרכוש את הלייזרים אצל כל אחד מיבואני הציווד למעבדות הפיסיקה של בתי הספר, אלא שחברות הציווד המעבדתי אותן מייצגים סוכנים אלו אינן מייצרות לייזרים, אלא רוכשות אותם מהיצרנים המפורטים בטבלה 1. בדרך זו נוסף עוד שלב תיווך, דבר המעלה בדרך כלל את מחיר הלייזר.

### כיוונים לעתיד הקרוב - לייזרי דיודה

קיימת נטייה בעולם להחליף את לייזרי ההליום-נאון שהם גדולים, מגושמים ושבירים, בלייזרי דיודה שהם קטנים (מסדר גודל של טרנסיסטור), קומפקטיים ועמידים בתנודות מכניות (נפילה!).

**שתי הבעיות הגדולות** שהגבילו עד היום את השימוש בלייזרי דיודה במעבדות הפיסיקה בבתי הספר הן:

1. אורך הגל הקצר ביותר בתחום הנראה שאפשר היה לקבל מלייזרים אלו היה 670nm. אורך גל זה נמצא בקצה התחום האדום של הספקטרום הנראה, איזור ספקטרי שהעין כמעט ואינה רגישה אליו. על מנת לקבל אפקטים דומים ויזואלית לאלו המתקבלים מלייזר הליום-נאון שהספקו 0.5mW, היה צורך להשתמש בלייזר דיודה בהספק של 3mW. דרישה זו יוצרת בעיות בטיחות בשימוש בלייזר (דורשת אמצעי בטיחות חמורים יותר).

2. אלומת הקרינה הנפלטת מלייזר דיודה היא בעלת חתך מלבני (הקרינה נפלטת מפרוסה דקה של חומר מוליך למחצה הנמצאת בין פרוסות אחרות - סנדביץ!). אלומה מסוג זה לא קל למקד לנקודה על ידי עדשות רגילות. לעומת זאת, אלומת הקרינה הנפלטת מלייזר הליום - נאון היא בעלת חתך עגול (עם התפלגות עוצמה גאוסיאנית), וניתן להשתמש בעדשות הרגילות במעבדה כדי לבצע את כל ההדגמות והניסויים הדרושים.

לשתי בעיות אלו נמצא פיתרון בתקופה האחרונה:

1. הצליחו לפתח לייזרי דיודה שאורך הגל הנפלט מהם נמוך ומגיע כבר ל-630nm עבור יחידות מסחריות. לייזרים אלו הם בבחינת סנוניות ראשונות, ולכן מחירים עדיין גבוה (מסדר גודל של \$700). בשלבי פיתוח נמצאים לייזרי דיודה שאורך הגל הנפלט מהם מגיע לצד הכחול של הספקטרום הנראה.

התחזית היא שמחירי הלייזרים הללו ירדו תוך מספר שנים עד לעשרות דולרים ליחידה בודדת, ולרכישת כמויות גדולות המחירים ירדו אף לדולרים בודדים ליחידה.

2. פותחו מערכות עדשות מתאימות ללייזרי דיודה. מערכות אלו כוללות עדשה גלילית, כך שהקרן הנפלטת מיחידת הלייזר עם העדשות היא בעלת חתך מעגלי ואיכות קרן טובה לניסויים. בדרך כלל כל לייזר דיודה מסחרי נמכר עם מערכת העדשות בקצהו כיחידה מוכנה לשימוש.

הערכת המחבר היא כי בתוך שנים ספורות יחליפו לייזרי הדיודה את לייזרי הליום-נאון ברוב היישומים הפשוטים (ובין אלה נכללים מרבית היישומים במעבדת הפיסיקה בבית הספר התיכון). בשלב ראשון ירדו המחירים למחירים הדומים לאלו של לייזרי הליום-נאון, ותוך מספר שנים ירדו למחיר מוצרי צריכה של עשרות דולרים ליחידה.



### סיפור מהחיים - סומר קרס

זכינו, כל המשפחה, בזרט 'חסד בין כוכבים'. ואפילו אלו אוי בני בן השש:  
'אבא, מה זה הפייזר שקפטיין קירק (המפקד האלילי) למצוק בזי?  
הממלאי להסבוי או שיש אייזר שהוא מכשיר קריינג או וכו'... ואז הוא הפסיק אוי באוסר 20/בנוי ואמרי:  
'אבא, אייזר זה פשוט, ואני יודע מה זה, אני שאמרי זה פייזר...'