

מכון ויצמן
מדרשת פיינברג

יצירת הרמוניות גבוהות (HHG) על ידי

התאבכות שני אורכי גל

פרויקט גמר במסגרת קורס מעבדות קיץ

מגישים : עמנואל עובדיה ומיכאל שקולניק

מנחה : ד"ר ברי ברונר

תוכן העניינים

IV	תודות
V	תקציר
6	1. מבוא
6	2. רקע מדעי
6	2.1 שיטת יצירת פולסים קצרים של אנרגיה גבוה
8	3. תיאור מערכת
8	3.1 הגברת האות הגולמי לכדי פולסים קצרים ואנרגטיים מאוד
8	3.1.1 יצירת פולסים קצרים באנרגיה נמוכה
9	3.1.2 מתיחת פולסים באנרגיה נמוכה
9	3.1.3 הגברת פולסים – אנרגיה גבוה
10	3.1.4 דחיסת פולסים באנרגיה גבוה
12	3.2 מדידת רוחב פס, פאזה ושיפור האות ע"י מכשיר "צפרדע" (FROG)
14	3.3 שינוי אורכי גל ע"י מכשיר OPA
14	3.4 מסנן מרחבי (spatial filter)
15	3.5 ספקטרומטר XUV
16	4. תיאור הניסוי
16	4.1 השפעת ההתאבכות על יצירת הרמוניות גבוהות (HHG)
16	4.2 מערך חיבור הקרניים
18	5. עיבוד ותוצאות
18	5.1 תוכן המדידות
18	5.2 תהליך ניתוח התוצאות
19	5.3 תוצאות
21	5.4 דיון
24	6. מסקנות
24	7. סיכום
25	ביבליוגרפיה
1	נספחים
1	1. קוד מטלאב לניתוח המדידות

רשימת איורים

- 7..... 1. תהליך יצירת פולסים קצרים (האיור נלקח מתוך כתב עת תקופתי (PALANKER, 2018)).
- 8..... 2. אוסצילטור ליצירת פולסים קצרים בעלי אנרגיה נמוכה.
- 8..... 3: מדידת סקופ של האות היוצא מהאוסצילטור
- 9..... 4: האות הנכנס לאוסצילטור
- 9..... 5: שני מגבירים.
- 10..... 6: מבנה הכללי של המגבר.
- 10..... 7: מהלך קרניים דרך מגבר.
- 11..... 8: מבנה של מדחס. (האיור נלקח מתוך מאמר (MOUROU, 1985)).
- 11..... 9: מדחס במעבדה.
- 11..... 10: מהלך קרניים דרך מדחס.
- 12..... 11: תהליך דחיסה. האיור והפסקה הקצרה נלקחו ממאמר (TREACY, 1969)
- 12..... 12: האות היוצא ממדחס. האיור נלקח ממאמר (MOUROU, 1985).
- 13..... 13 : מדידת צורת הפולס בזמן ע"י אוטוקורלציה. נלקח מהאתר SWAMP OPTICS
- 13..... 14: מכשיר ה-FROG
- 13..... 15: האותות היוצאים ממכשיר ה-FROG
- 14..... 16: מכשיר ה-OPA
- 15..... 17: מהלך קרניים בתוך SPATIAL FILTER
- 15..... 18: מהלך קרניים בתוך ספקטרומטר.
- 15..... 19: כניסתו לתא ריק דרך מראה כדורית.
- 16..... 20: פליטת XUV. התמונה המרכזית היא ברוחב של 1000 פיקסלים ובגובה של 100 פיקסלים.
- 17..... 21: המהלך של שתי הקרניים (1300nm, 800nm).
- 17..... 22: מערך הניסוי לאחר יצירת פולס הלייזר.
- 18..... 23: דוגמה לתוצאות, מדידה 5: השוואה בין HHG הנוצר עם וללא התאבכות (A), ויחס ההגברה (B).
- 19..... 24 : מדידה מס' 1 : עם ובלי התאבכות (A) ויחס ההגברה (B)
- 19..... 25 : מדידה מס' 2
- 20..... 26 : מדידה מס' 3
- 20..... 27 : מדידה מס' 4
- 20..... 28 : מדידה מס' 5
- 21..... 29 : מדידה מס' 6
- 22..... 30 : גבולות אורכי הגל בהם מופיעות ההרמוניות
- 22..... 31 : אורכי הגל של ההרמוניות החופפות

טבלאות

- 18..... 1 : פירוט עוצמות הסינון עבור 6 המדידות השונות
- 21..... 2 : תוצאות ההגברה לפי מדידה

תודות

אנחנו רוצים להודות על החוויה שבביצוע פרויקט זה לד"ר ברי ברונר שפינה זמן בכדי ללוות אותנו במשך שבועיים רצופים, הסביר כל פרט במעבדה, ענה על כל שאלה, השיג ציוד, וכיוון הנחה והדריך את הניסויים שלנו.

לצדו נרצה לציין גם את שאר קבוצת דודוביץ' במכון שסייעו, ייעצו וקיבלו אותנו לשורותיהם, גם אם לתקופה קצרצרה.

לבסוף, אנו מודים לפרופ' שמעון לויט ופרופ' אמנון חזן שתיאמו, שכנעו, דחפו ודאגו מאחורי הקלעים לתשתית המנהלתית כך שקיום הפרויקט יתאפשר.

מעל לכל, אנחנו רוצים להודות לבורא עולם – על העולם המורכב והנפלא שברא, ועל הרצון והתבונה שנטע בנו להבין מעט מזער בו.

תקציר

במסגרת קורס מעבדה הצטרפנו למשך שבועיים לקבוצה של פרופ' נירית דודוביץ, העוסקת בלייזרים בעלי פולסים עם עוצמות גבוהות ומשך זמן קצר מאוד (אטושניות, $10^{-18}sec$), בהנחייתו ובהדרכתו הצמודות של ד"ר ברי ברונר. לאחר שהבנו את פעילות המעבדה העוסקת ביצירת הרמוניות גבוהות (High harmonic generation – HHG) המאפשרת שימוש ב-XUV – קרני X רכות, בצענו ניסוי להגברת ההסתברות למנהור וינון אלקטרוניים הנדרשים ב-HHG. בניסוי הקרנו את הלייזר על גביש מגנזיום-חמצן (MgO) כדי ליצור הרמוניות גבוהות (HHG), וערכנו השוואה בין התוצאות שהתקבלו מקרן בעלת אורך גל בודד לבין הקרנת התאבכות של שני אורכי גל. בניתוח תוצאות הניסוי ע"י תוכנת מטלב קבלנו עדויות ליעילות שיטת ההתאבכות ב-HHG.

As part of a laboratory course, we joined for two weeks to Professor Nirit Dudovich's group that deals with intense and very short (attoseconds, $10^{-18}sec$) pulsed lasers, with the guidance and direction of Dr. Barry Bruner. After understanding the lab activity involved with achieving the high harmonic generation (HHG) enabling the creation of XUV - soft X-rays, we performed an experiment to increase the probability of electron tunneling and ionization required for HHG. In the experiment we illuminated a magnesium-oxygen crystal (MgO) with the laser to achieve HHG, and we compared the results received from the single wavelength ray and the results using a ray consisting of two wavelengths in interference. Using Matlab we analyzed the data and obtained evidence of the efficiency of the method of interference in the HHG.

1. מבוא

הניסוי שביצענו במעבדה מהווה פריצת דרך לשיפור היעילות ביצירת הרמוניות גבוהות (HHG) ע"י התאבכות של שני אורכי גל שונים. אמנם הניסוי כבר נעשה בגז קריפטון ופורסם במאמר (Barry D. Bruner, 2018), אך מה שהתחדש במקרה שלנו – הוא ביצוע הניסוי על גביש MgO, שצפוי לשפר את המכשירים העתידיים ליצירת קרינה רכה של XUV. במאמר הנ"ל הוסבר שהתאבכות של שני אורכי גל מעלה את הסתברות היינון של אטומי קריפטון, ועלייה במספר האטומים המיוננים גורמת לעלייה בכמות האלקטרונים העוברים דרך מחסום הפוטנציאל במנהור, מואצים ע"י השדה הא"מ של הלייזר, ולבסוף חוזרים ע"י אותו השדה אל יון האב ופולטים את קרינת ה-XUV הגורמת ליצירת הרמוניות גבוהות (HHG) (W. Boyd, 2008).

2. רקע מדעי

האלקטרונים באטום נמצאים בבור פוטנציאל קולוני הלוכד אותם סביב הגרעין. ע"י עירור בשדה א"מ חזק, האלקטרונים מקבלים מספיק אנרגיה בכדי לעבור את המחסום דרך מנהור. בחישוב גס עוצמת השדה הנדרש בשביל ליינן אטום הוא:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kq}{r^2} = \frac{9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19}}{10^{-20}} = 1.4 \times 10^{11} \frac{V}{m} \quad (1)$$

עוצמת ההארה במקרה הזה צריכה להיות מחושבת לפי הנוסחה (W. Boyd, 2008):

$$I = \frac{1}{2} n \epsilon_0 c E^2 \approx 10^{16} \frac{W}{cm^2} \quad (2)$$

חשוב לשים לב – כדי לקבל את העוצמה הזו נדרש הספק של יותר מ-100GW עבור הלייזר. החישוב הוא פשוט: אם מוקד האלומה בקוטר $30\mu m$, יוצא שטח החתך: $A = \pi r^2 \approx 7 \times 10^{-6} (cm^2)$. אם נכפיל אותו בעוצמת ההארה נקבל הספק $700GW$. מוויקיפדיה אפשר לראות ששיא הספק החשמל בישראל היה אך ורק $14.6GW$ (אוגוסט 2020), ולכן ברור שלא מעשי ליצור את ההספק באות רציף. לעומת זאת, באותות אולטרה-קצרים כפמטו-שניות, אף באנרגיה נמוכה אפשר להשיג את העוצמה הנדרשת. אם, למשל, האנרגיה של הלייזר היא כ-10mJ, הלייזר שיוצר פולס באורך של כ-100fs, מאפשר הספק של

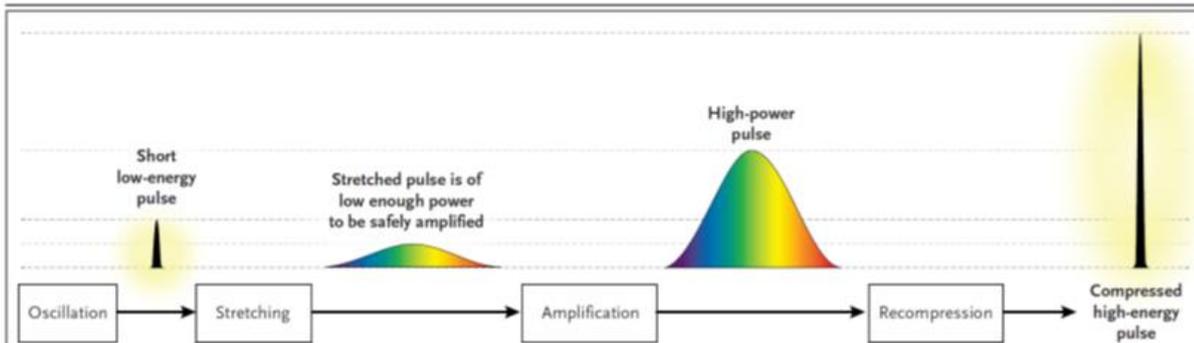
$$P = \frac{E}{t} = \frac{10^{-2}}{10^{-13}} = 100(GW)$$

הבעיה הנלווית לפולסים כאלו היא שהעוצמה בשיאם גורמת לתופעות לא ליניאריות חזקות מאוד, ובין השאר למיקוד עצמי (דרך אפקט Keir), דבר שעלול להרוס כל חומר דרכו האות עובר, כולל הגביש המשמש להגברה עצמה. השיטה להתגבר על תופעות אלו וליצור פולסים קצרים נקראת CPA (Chirped pulse amplification) ופותחה ע"י אשקין, מורואו וסטריקלנד במאמרם (Mourou, 1985). בשנת 2018 הם קבלו על כך את פרס הנובל בפיזיקה.

2.1 שיטת יצירת פולסים קצרים של אנרגיה גבוהה

השיטה בנויה על 3 שלבים: מתיחה ספקטרלית של הפולס, הגברתו ודחיסתו בחזרה.

אפשר לראות את השלבים באיור 1 הבא :



איור 1. תהליך יצירת פולסים קצרים (האיור נלקח מתוך כתב עת תקופתי (Palanker, 2018)).

מכיוון שהשיטה החדשה אפשרה יצירת פולסים אינטנסיביים וקצרים בסדר גודל של אטו-שניות ($10^{-18}s$) קשה להפריז בחשיבות שלה למחקר בפיזיקה. אחת הדוגמאות המלהיבות ביותר (שגם נוגעות לניסויים שלנו) היא תנועת האלקטרון סביב הגרעין: מחישוב פשטני של משיכה קולונית ותנועה מעגלית ניתן לקבל שזמן המחזור של התנועה הוא בסדר גודל של 400 אטו-שניות. מדידות בסדר גודל הזה מהוות צעד חשוב בהבנת הפיזיקה הקשורה בתהליכים השולטים על האלקטרון (כמו תהליך היינון, בו אנחנו משתמשים), ובכלל, בפיזיקה של מרחקים הקטנים מאנגסטרם (Å).

תהליך יצירת הפולסים הקצרים מורכב מהשלבים הבאים, עליהם נפרט :

1. יצירת פולסים קצרים באנרגיה נמוכה,
2. מתיחת פולסים באנרגיה נמוכה,
3. הגברת פולסים לאנרגיה גבוהה,
4. דחיסת פולסים באנרגיה גבוהה.

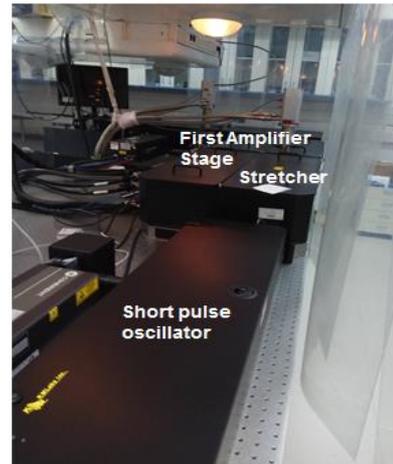
3. תיאור מערכת

3.1 הגברת האות הגולמי לכדי פולסים קצרים ואנרגטיים מאוד

כפי שנכתב מעלה, יצירת הפולסים הקצרים היא תהליך המורכב מ-4 שלבים:

3.1.1 יצירת פולסים קצרים באנרגיה נמוכה

כדי ליצור פולסים קצרים נשתמש באוסצילטור. איור 2 מתאר את האוסצילטור במעבדה שלנו:

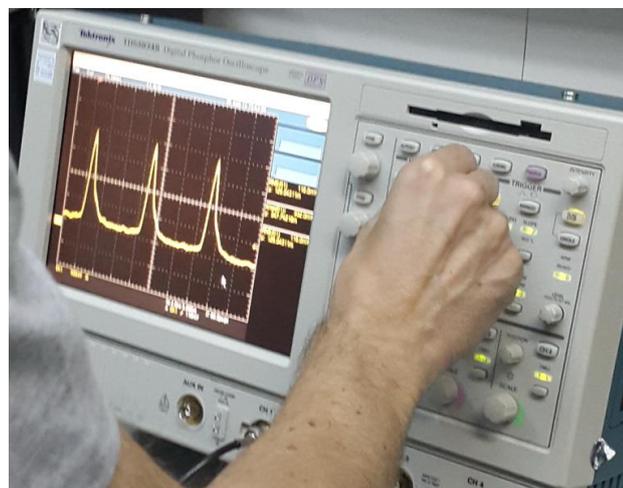


איור 2. אוסצילטור ליצירת פולסים קצרים בעלי אנרגיה נמוכה.

בתוך האוסצילטור קיימת מערכת אופטית בלבד הבנויה ממראות, גביש ו-2 פריזמות. את האות היוצא מהאוסצילטור אפשר לראות באיור 3, והוא יוצא בתדירות של כ-80MHz עם הספק של

$$E = \frac{P}{f} = \frac{380 \times 10^{-3}}{80 \times 10^6} \approx 5nJ$$

משמע אנרגיה של: $5nJ$, עבור כל פולס.



איור 3: מדידת סקופ של האות היוצא מהאוסצילטור

רוחב הספקטרום היוצא מאוסצילטור ניתן לחישוב מתוך התדירות $f = \frac{c}{\lambda}$:

$$df = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda \quad (3)$$

כאשר האות הנכנס לאוסצילטור מתואר באיור 4:



איור 4: האות הנכנס לאוסצילטור

אם $\Delta\lambda = 50\text{nm}$, $\lambda = 790\text{nm}$, אז לפי נוסחה 3 יוצא: $df = 2.4 \times 10^{13}\text{Hz}$, וכיוון שהפולס

הוא גאוסיאני, זמן הפולס הוא: $\Delta t = \frac{0.44}{\Delta f} \approx 15\text{fms}$.

3.1.2 מתיחת פולסים באנרגיה נמוכה

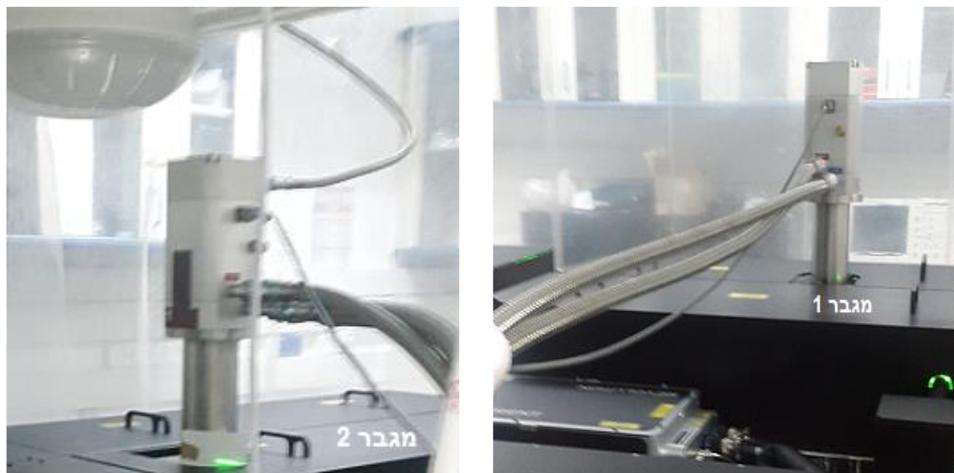
מתיחת הפולסים נעשית בתוך אוסצילטור. אחרי כל שיקוף דרך המראות, הקרן העוברת דרך הגביש משנה את הצורה ורוחב הספקטרום ע"פ נוסחה 4:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (4)$$

אחרי הגביש, הקרן עוברת דרך 2 מנסרות הפועלות כמו סריגים: האחת פורסת את הקרן לפי אורך הגל, והשניה מאחדת אותה בחזרה לכדי קרן בודדת, ותוך כדי הפריסה והאיחוד, המנסרות גורמות לכל אורך גל לעבור דרך מעט שונה. בתהליך הזה הפולס נמרח על פני זמן רב יותר על פי ספקטרום אורכי הגל. תוך כדי התהליך, יורדת גם דיספרסיה מהגביש.

3.1.3 הגברת פולסים – אנרגיה גבוהה

הפולסים המתוחים עוברים דרך שני מגברים. איור 5 מתאר את מקומם:



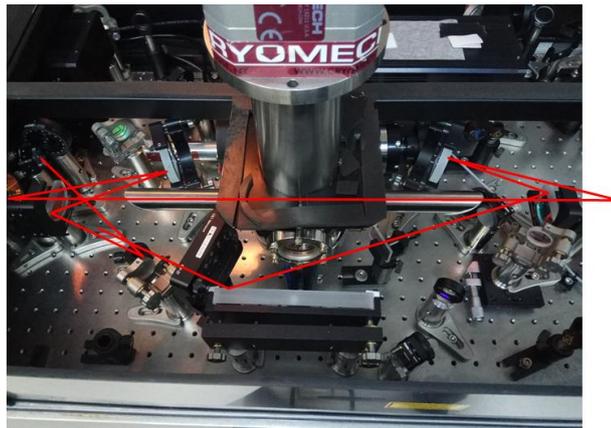
איור 5: שני מגברים.

המבנה הכללי של המגבר מתואר באיור 6 :



איור 6: מבנה הכללי של המגבר.

איור 7 מראה את מהלך הקרניים דרך המגבר :

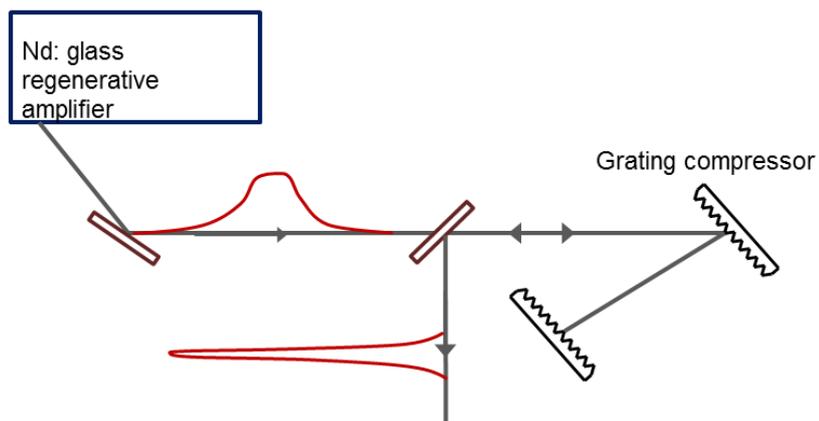


איור 7: מהלך קרניים דרך מגבר.

הקרן נכנסת למערכת המראות של המגבר הראשון המכוונת באופן מדויק כך שתעבור דרך הגביש 13 פעמים. אחרי המגבר הראשון הקרן היוצאת מוגברת פי כ-מיליון: $\sim 10^6$, והספק היציאה מהמגבר הראשון הוא $P_1 = 2000\text{mW}$, בתדירות $f = 1\text{kHz}$, כך שהאנרגיה ביציאה מהמגבר הראשון היא: $E_1 = 2\text{mJ}$. המגבר השני מגביר פי 10 בלי לשנות את התדירות, ולכן ההספק ביציאה הוא $P_2 = 20\text{W}$, והאנרגיה $E_2 = 20\text{mJ}$. הסיבה להבדל הקיצוני בין יחסי ההגברה בשני המגברים קשורה להקטנת הפליטה הספונטנית המוגדרת כרעש והגברת הפליטה המאולצת. בנוסף, ישנה כאמור מגבלה על העוצמה המרבית, ואם האותות יחרגו ממנה, ייווצר מיקוד עצמי והגביש עשוי להיזק ואף להישרף.

3.1.4 דחיסת פולסים באנרגיה גבוה

תהליך דחיסת הפולסים דומה לתהליך פריסה הפוך, כאשר המדחס בנוי משני סריגים, מערך מנסרות המחזיר את הקרניים, ומפצל (beamsplitter). תיאור מקורב ניתן לראות באיור 8 :



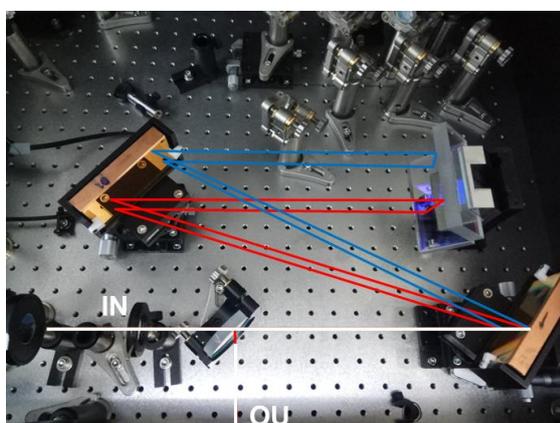
איור 8: מבנה של מדחס. (האיור נלקח מתוך מאמר (Mourou, 1985)).

איור 9 מראה את המדחס במעבדה שלנו:



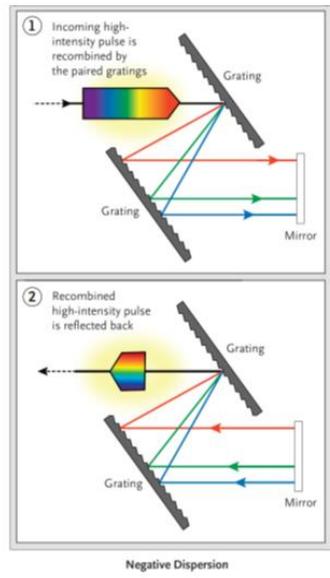
איור 9: מדחס במעבדה.

איור 10 מראה מהלך קרניים דרך מדחס:



איור 10: מהלך קרניים דרך מדחס.

תהליך הדחיסה מתואר היטב באיור 11 ובפסקה הקצרה המצורפת אליו :



The grating pair (*compressor*) reverses the stretching/chirping using a scheme that had been largely ignored to that point:

איור 11: תהליך דחיסה. האיור והפסקה הקצרה נלקחו ממאמר (Treacy, 1969)

באיור 12 ניתן לראות את הפריסה בזמן של אות לדוגמה, לפני ואחרי מעבר דרך מדחס :

Chirped pulse before amplification (300 ps) Compressed pulse after amplification (1.5 ps)

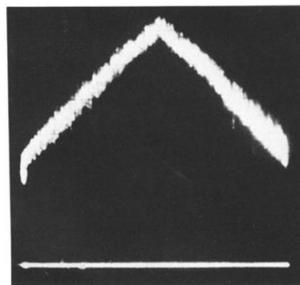


Fig. 2. Autocorrelation of stretched pulse at output of fiber. The pulse is rectangular in shape with a 300 ps pulsewidth.

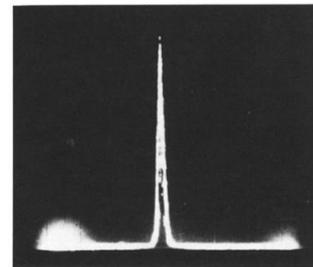


Fig. 3. Autocorrelation of 1.5 ps compressed pulse.

Results: 1 mJ, 1.5 ps = 0.66 GW

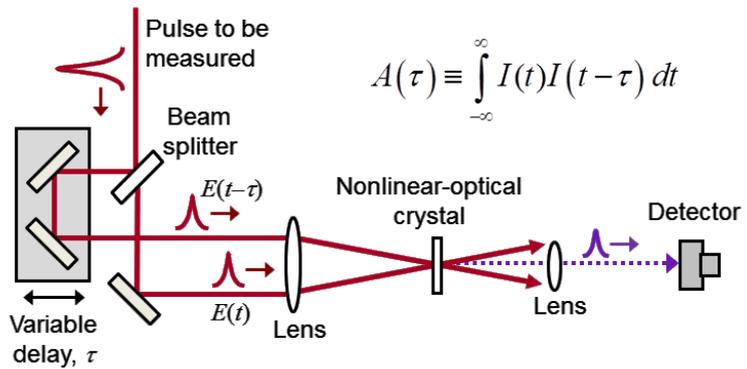
איור 12: האות היוצא ממדחס. האיור נלקח ממאמר (Mourou, 1985).

חשוב לציין שמרגע שהפולס נדחס, כמעט ואין אפשרות להעביר אותו דרך חומרים, שמא יבצע מיקוד עצמי ויפגע ברכיבים האופטיים. לכן מכאן ואילך כמעט כל רכיב הוא משקף ולא מעביר, אלא אם חלק גדול מהאות מפוצל לפניו.

3.2 מדידת רוחב פס, פאזה ושיפור האות ע"י מכשיר "צפרדע" (FROG)

אחרי המדחס הקרן עוברת במפצל (beam-splitter) ואחת הקרניים המפוצלות מגיעה למכשיר בשם FROG (Frequency-resolved optical gating). המכשיר מודד את רוחב הפס של האות ונותן אינדיקציה על הפאזה. מכשירים אלקטרוניים יכולים לעבוד בטווחי זמן מקסימליים של

פיקושניות על אלקטרוניקה עבור ביצוע המדידות, אלא על אופטיקה לא לינארית. בתוך המכשיר הקרן מתפצלת לשתיים. קרן אחת ממשיכה ישר בעוד הקרן השנייה עוברת בגביש פנימי, ובסוף שתי הקרניים מתמקדות יחד אל הספקטרומטר ומתאבכות. באיור 13 ניתן לראות את המערכת בצורה פשוטית עבור קורלציה-עצמית למדידת עוצמת הפולס על פני הזמן :

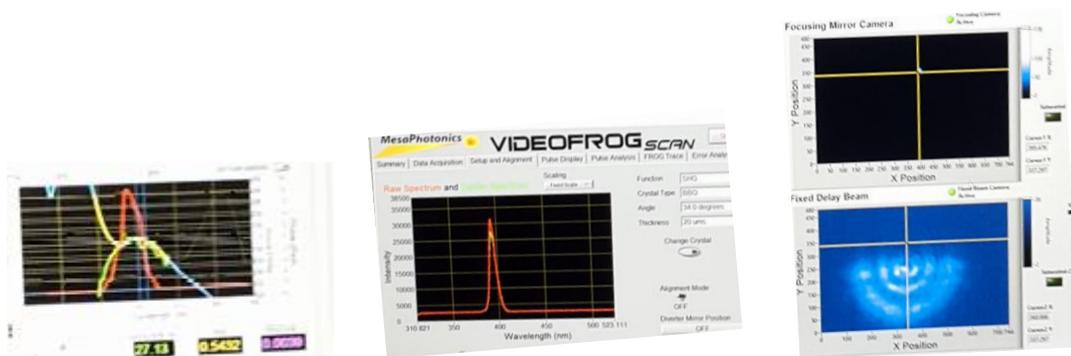


איור 13 : מדידת צורת הפולס בזמן ע"י אוטוקורלציה. נלקח מהאתר Swamp Optics

באחד מסוגי המדידות, המכשיר נותן התמרת פורייה של ההתאבכות מה שמאפשר לקבל מידע על הפאזה הספקטרלית של האות. איור 14 מראה את המכשיר, איור 15 מדידות שונות שניתן לבצע בעזרתו :



מקבץ איורים 14: מכשיר ה-FROG

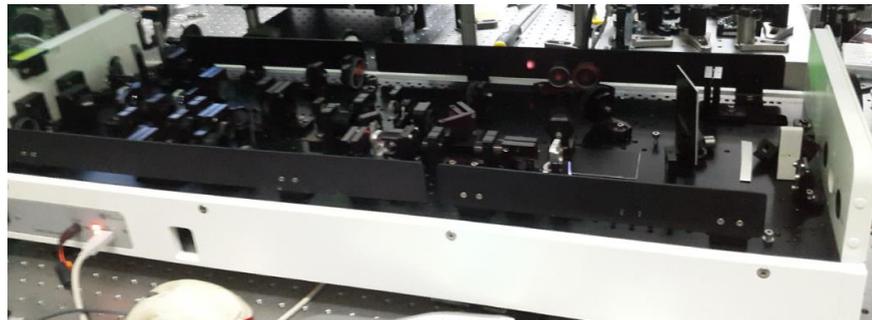


מקבץ איורים 15: האותות היוצאים ממכשיר ה-FROG

מתוך איור 15 אפשר לראות שרוחב הפס הוא בערך $27nm$ ואת זה ניתן היה לגלות גם ע"י ספקטרומטר רגיל, אך בתמונה שמאלית אפשר לזהות את פיתוח הטיילור של האות. על ידי המכשיר יכולנו לשנות את הדחיסה מצד אחד והמצד השני להזיז את האלומה במחשב הראשי כדי שתקבל ב-FROG תמונת חתך הקרן העגולה ביותר.

3.3 שינוי אורכי גל ע"י מכשיר OPA

האות שנוצר והוגבר הוא באורך גל של כ- $800nm$. הבחירה באורך גל זה נובעת מהקלות היחסית לצור ולעבד אותו. עם זאת, כדי לקבל הרמוניות גבוהות נדרש אורך גל ספציפי. במקרה שלנו, האות הנדרש ליצירת ההרמוניות הגבוהות בגביש ה- MgO הוא אינפרא אדום, ואורך הגל שלו הוא כ- $1300nm \approx \lambda$. לצורך שינוי אורכי הגל מתבצע שימוש במכשיר הנקרא OPA – מכשיר אופטי המאפשר לפצל אות נכנס לשני אותות נפרדים באורכי גל אותם ניתן לכוונן (סכום התדרים חייב להיות התדר המקורי, או בניסוח אחר, $\frac{1}{\lambda_{in}} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$). במכשיר יש מערכת אופטית עם מראות, מפצלים ו-4 גבישים. האות הנכנס למכשיר הוא כאמור באורך גל של כ- $800nm$. כמו כן המכשיר מספק אור לבן המכיל גם אינפרא-אדום. עבור מערכת הניסויים שלנו, מכשיר ה-OPA כוונן כך שיוציא אות באורך גל של $1300nm$, וכתוצר לוואי, הוא יוצר גם אות באורך גל של $2080nm$, בו לא ביצענו שימוש. איור 16 מתאר את המכשיר ומהלך קרניים בתוכו:

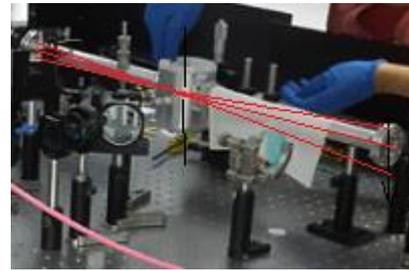


איור 16: מכשיר ה-OPA

3.4 מסנן מרחבי (spatial filter)

כדי לנקות את האות מרעשים, מעבירים אותו דרך פילטר מיוחד הבנוי משפופרת ריק שבשני קצותיה עדשות מרכזות, ובמרכזה צמצם. העדשה הראשונה מרכזת את האות במישור הצמצם. במישור זה, צורתו המרחבית של האות מהווה התמרת פוריה לאות המקורי, ולכן אות נקי המגיע כגאוסיאן אל המסנן יצור נקודת מיקוד מרוכזת, שמכוונת בדיוק אל מרכז הצמצם (לא רק מבחינת מרכז המעגל, אלא גם מרכז העובי שלו). אם האות אינו נקי, יוצרו נקודות מיקוד נוספות לפני או אחרי מרכז הצמצם, וייווצרו מעגלים נוספים סביב נקודת המוקד. שני סוגי ההפרעות הללו נבלעים בצמצם עצמו, והאות היוצא מהצמצם הוא החלק הנקי. האות הנקי ממשיך ללא הפרעה ומגיע אל העדשה, שם הוא חוזר להיות גאוסיאן מרחבי. חשוב לציין שהמסנן המרחבי מפחית את עוצמת האות, אך הוא יעיל מאוד בהפחתת הרעש ביחס לאות הנותר, ולכן משפר מאוד את איכות התוצאות המתקבלות. השימוש בשפופרת הריק חשוב כיוון שעוצמת הפולסים

גבוהה מאוד, וכאשר הלייזר ממוקד בנקודה, הוא חזק מספיק על מנת ליינן את האוויר, דבר שמאוד לא רצוי במהלך מדידה. ניתן לראות שרטוט של מהלך הקרניים כפי שתואר על פני צילום המסך באיור 17 :

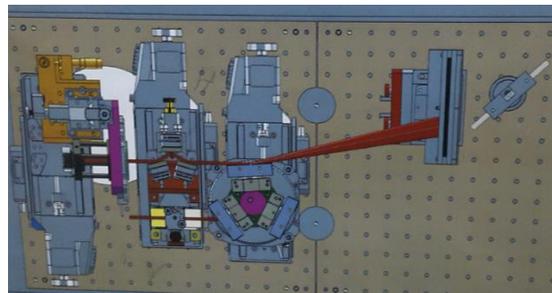


איור 17: מהלך קרניים בתוך spatial filter

במהלך כיוונון המערכת השתמשנו בצמצם שקוטרו $300\mu\text{m}$, אבל תוצאות הסינון היו בעייתיות. כאשר עברנו לצמצם בקוטר של $400\mu\text{m}$, איכות התוצאות עלתה באופן ברור, והצלחנו למדוד עד ההרמוניה ה-32. אנחנו משערים שהאות התמקד בנקודה שהייתה רחבה מידי עבור הצמצם הקטן, בין אם בגלל צורה לא גאומטרית שגרמה לפריסה מרחבית משמעותית, ובין אם בגלל השפעות לא ליניאריות של מעבר האות דרך העדשות, דבר שידוע כגורם חשוב בעוצמות כאלה.

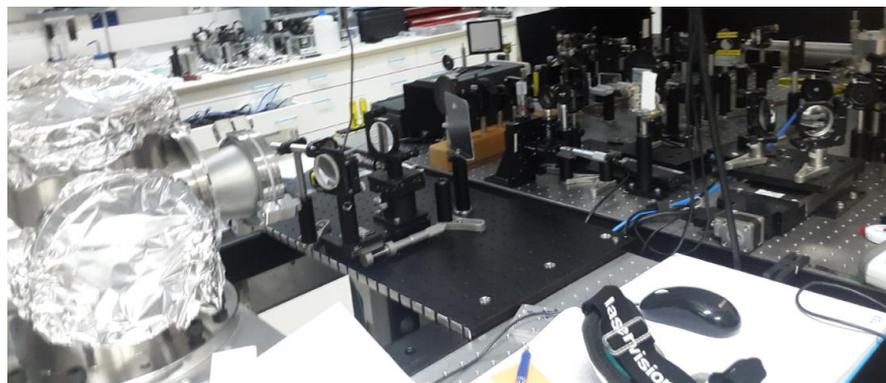
3.5 ספקטרומטר XUV

לאחר המסנן המרחבי, הקרן מתמקדת דרך מראה כדורית על הגביש MgO הנמצא בתוך תא ריק. עוצמת האור מעוררת אלקטרון בתוך הגביש וגורמת לינון דרך מנהור. האלקטרון בסוף חוזר ע"י אותו השדה הא"מ המשתנה אל יון האב ופולט אור בתחום ה-XUV הנמדד ע"י ספקטרומטר XUV. איור 18 מתאר את מהלך הקרן בתוך ספקטרומטר :



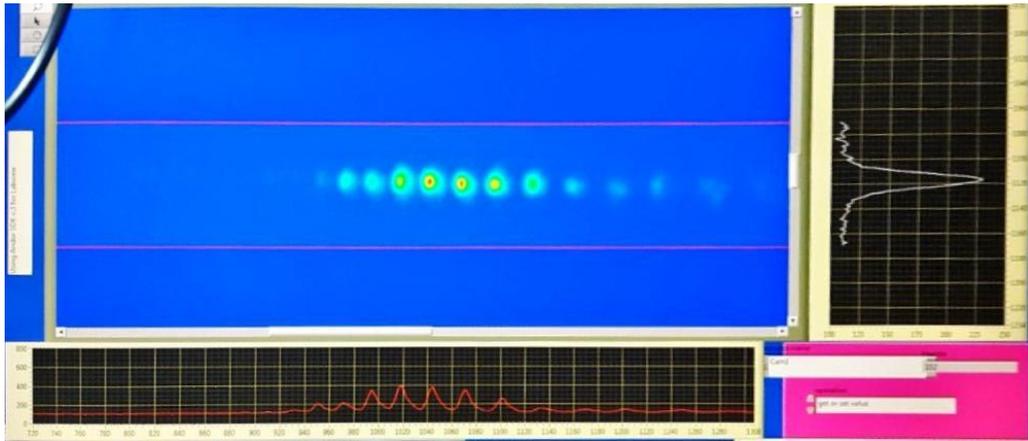
איור 18: מהלך קרניים בתוך ספקטרומטר.

איור 19 מתאר את תא הריק במעבדה, בו נמצאים הגביש והספקטרומטר :



איור 19: כניסתו לתא ריק דרך מראה כדורית.

איור 20 הוא צילום צג המחשב בעת ביצוע המדידות של פליטת ה-XUV :



איור 20: פליטת XUV. התמונה המרכזית היא ברוחב של 1000 פיקסלים ובגובה של 100 פיקסלים.

התמונה המרכזית היא חיישן הספקטרומטר עצמו. הסריג והחיישן מכוונים כך שהפרדה הספקטרלית תיווצר לאורך הציר האופקי, ובו אנחנו מתמקדים ב-1000 הפיקסלים שבאזור הרלוונטי. הציר האנכי הוא ציר מרחבי, בהפרדה של 100 פיקסלים. ניתן לראות גם את הגרפים מתחת ולצד התמונה המרכזית, שסוכמים כל אחד ציר אחר: על הגרף מימין לתמונה המרכזית ניתן לראות את הגאוסיאן המרחבי של העוצמה בכל התדירויות יחד (לאחר הסריג), ועל הגרף מלמטה ניתן לראות את העוצמה הכוללת של כל חלק בספקטרום (ומכך את ההרמוניות המתקבלות)

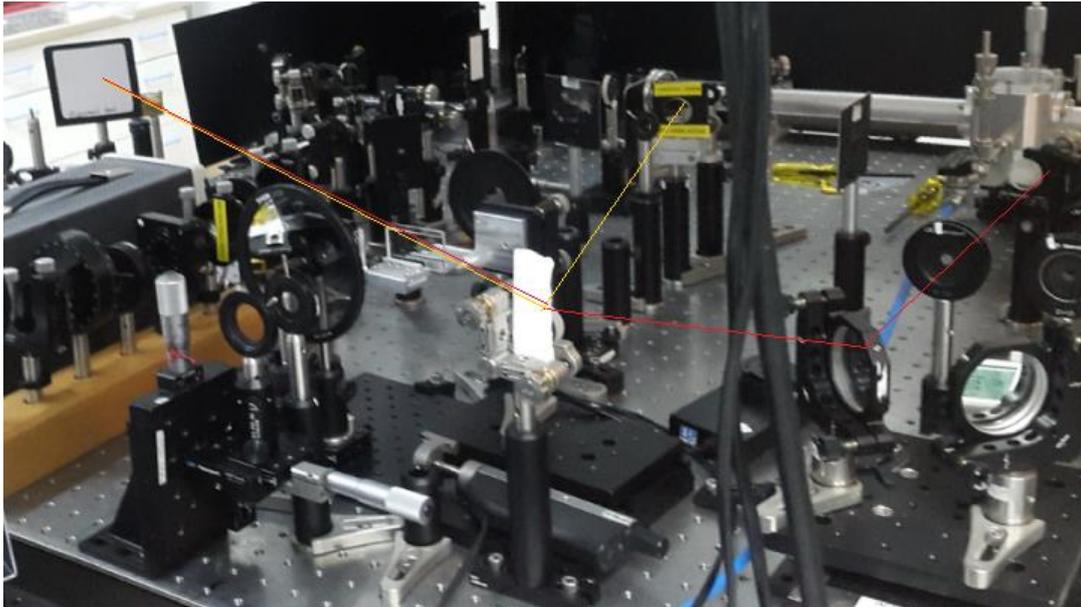
4. תיאור הניסוי

4.1 השפעת ההתאבכות על יצירת הרמוניות גבוהות (HHG)

לאחר תיאור מפורט של יצירת HHG במעבדה, התברר שכאשר התבצע הניסוי בגז קריפטון, אם הוסיפו לאורך הגל של $1300nm$, קרן בתדירות המקורית של הלייזר באורך גל של $800nm$, יעילות ה-HHG גדלה משמעותית. ניסוי זה עצמו כבר פורסם במאמר (Barry D. Bruner, 2018), אך אנחנו רצינו לבדוק ולנתח את התוצאות גם עבור גביש ה-MgO.

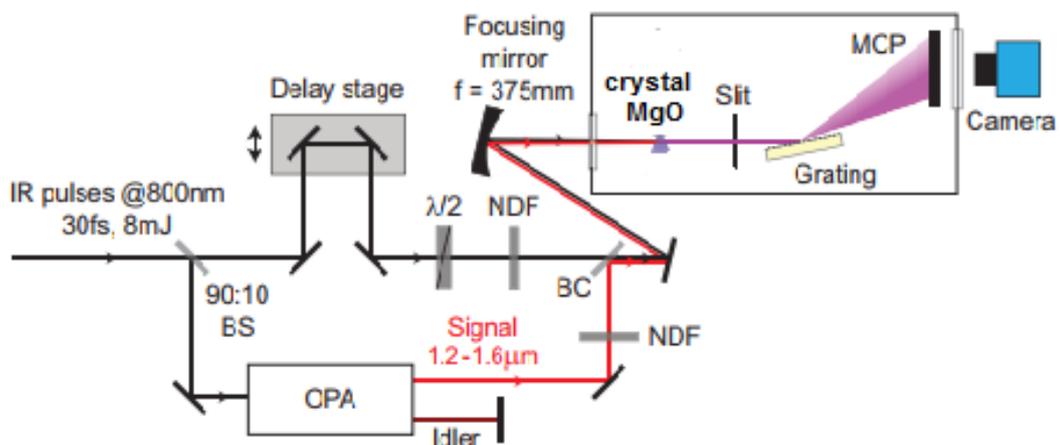
4.2 מערך חיבור הקרניים

אחרי היציאה מהמדחס, פיצלנו את הקרן ע"י מפצל. את החלק הראשון שהמשיך דרך המפצל, העברנו דרך מכשיר מעכב היכול להאריך באופן מבוקר את הדרך האופטית (זאת במטרה לפצות על הדרך אותה עוברת הקרן הנוספת, כאשר ההפרש המקורי בין הדרכים אינו גודל קבוע אלא עשוי להשתנות עם כל שינוי זעיר במערכת), ואת החלק השני שנשבר במפצל העברנו אל ה-OPA. את הקרן שיצאה ממנו ($1300nm$) חיברנו עם הקרן המעוכבת. לפני חיבור הקרניים, כל קרן עברה דרך פילטר עוצמה שאינו משפיע על ההרכב הספקטראלי של הקרן (NDF), כדי שנוכל לשלוט על הרכב הקרן המחוברת ולהבין איזה שילוב עוצמות של שתי הקרניים מביא לתוצאה אופטימלית. איור 21 מתאר את איחוד הקרניים אחרי העיכוב. הקרניים מתאבכות על המסך לצורך המחשה, ואם הכל תקין הן מתמקדות דרך מראה כדורית אל הגביש:



איור 21: המהלך של שתי הקרניים (1300nm, 800nm).

איור 22 מתאר את מערך הניסוי החל מהקרן היוצאת מהמגבר ועד לספקטרומטר שבסוף המערך, ובדרך מתאר את ההתאבכות של שתי הקרניים: הקרן היוצאת מה-OPA בעלת אורך הגל של 800nm, ושביר הקרן המקורית מהלייזר Ti:S בעלת אורך הגל של 1300nm

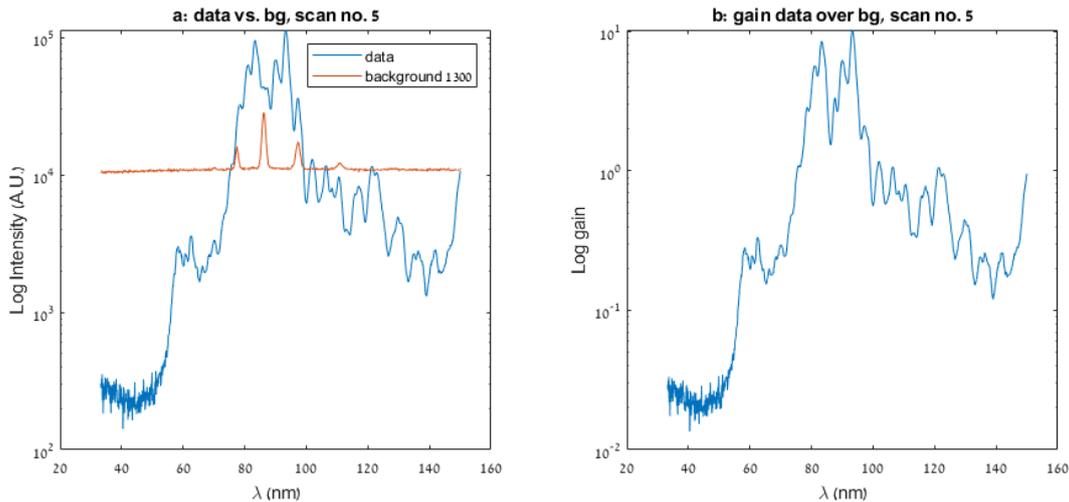


איור 22: מערך הניסוי לאחר יצירת פולס הלייזר.

לאחר שגרמנו לקרניים להתאבך, שלחנו את האות המחובר דרך המראה הכדורית אל תא הריק והגביש לביצוע הניסוי, וביצענו 6 מדידות עם מצבים שונים של עוצמות הסינון בפילטרים (NDF) דרכם עברו הקרניים.

5. עיבוד ותוצאות

באיור 23 ניתן לראות דוגמה ראשונית לתוצאות. בצד שמאל (a): גרף המשווה בין התוצאות המתקבלות בדרך המקורית, עם קרן בודדת של $1300nm$, לבין התוצאות המתקבלות מהתאבכות שתי הקרניים ($1300nm, 800nm$). מצד ימין (b) ניתן לראות את היחס בין העוצמות המתקבלות (יחס ההגברה), ולזהות באילו אורכי גל ההתאבכות נותנת תוצאות משופרות:



איור 23: דוגמה לתוצאות, מדידה 5: השוואה בין HHG הנוצר עם וללא התאבכות (a), ויחס ההגברה (b).

5.1 תוכן המדידות

כאמור, ביצענו 6 מדידות, בכל אחת מהמדידות קבענו עוצמה ספציפית עבור הפילטרים (פירוט העוצמות נמצא בטבלה מס' 1):

ND Filters		1300nm, OPA		
		0.2	0.3	0.4
800nm	1.0	Sc01	Sc02	Sc03
Ti:S	0.6	Sc04	Sc05	Sc06

טבלה 1: פירוט עוצמות הסינון עבור 6 המדידות השונות

אחרי שקבענו עוצמה לכל פילטר, תיעדנו סריקה של 80 תמונות מחיישן הספקטרומטר על פני 80 עיכובים שונים כדי למצוא את העיכוב האופטימלי לאותו כיוון של המערך שיאפשר הגעה של הפולסים בו-זמנית אל הגביש. על כל סריקה כזו ביצענו 3 חזרות. כפי שתואר באיור 20, כל תמונה היא בת 1000 על 100 פיקסלים.

5.2 תהליך ניתוח התוצאות

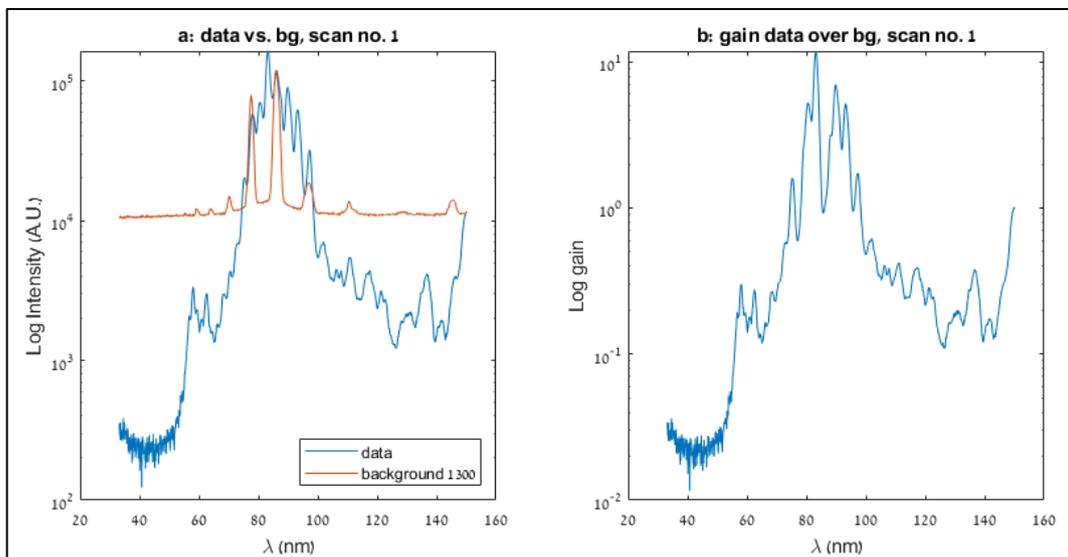
אחרי מיצוע התמונות וניקוי רעשי הרקע, סכמנו את העוצמה הכוללת בכל אחת מ-80 התמונות, ומצאנו את התמונה עם הסכום המקסימלי – היא התמונה שצולמה כאשר שני האותות הגיעו יחד. ניתן לראות המחשה של התהליך כאן: tinyurl.com/HHG-0Delay.

לאחר מציאת התמונה הרלוונטית, סכמנו על הציר המרחבי (הציר האנכי, באיור 20), וכיילנו את הפיקסלים האופקיים לאורכי גל. בסוף התהליך נותרה לנו עקומה שמתארת את העוצמה כתלות באורך הגל, ואותה שרטטנו יחד עם העקומה שהתקבלה בדרך המקורית ללא התאבכות - ע"י קרן בודדת (וכמובן, זהה בעוצמתה) באורך גל של 1300nm ללא הוספת הקרן של ה- 800nm , כפי שניתן לראות באיור 23 (a). בנוסף, שרטטנו את יחס ההגברה של המדידות עם ההתאבכות ביחס למדידות עם הקרן הבודדת.

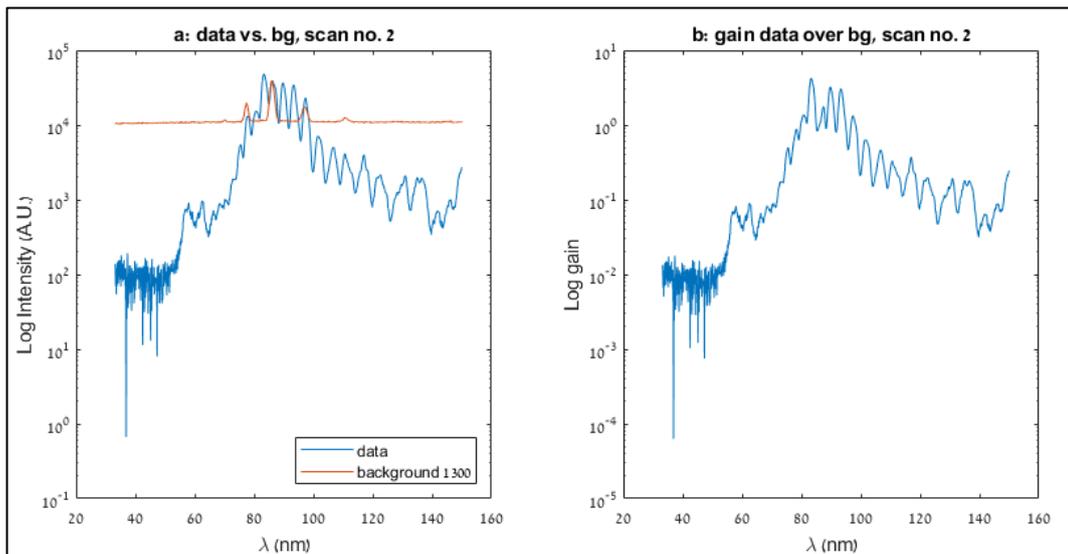
עבור התהליך הנ"ל כתבנו קוד מטלאב שיבצע זאת אוטומטית, והוא מצורף בנספח. על התהליך חזרנו 6 פעמים – פעם אחת עבור כל שילוב עוצמות פילטרים.

5.3 תוצאות

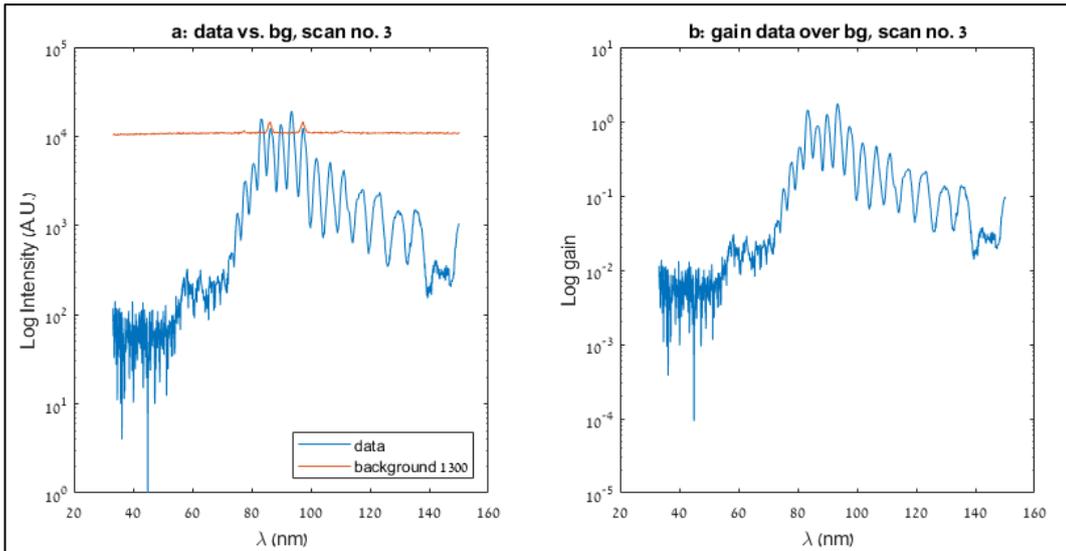
להלן תוצאות ששת המדידות:



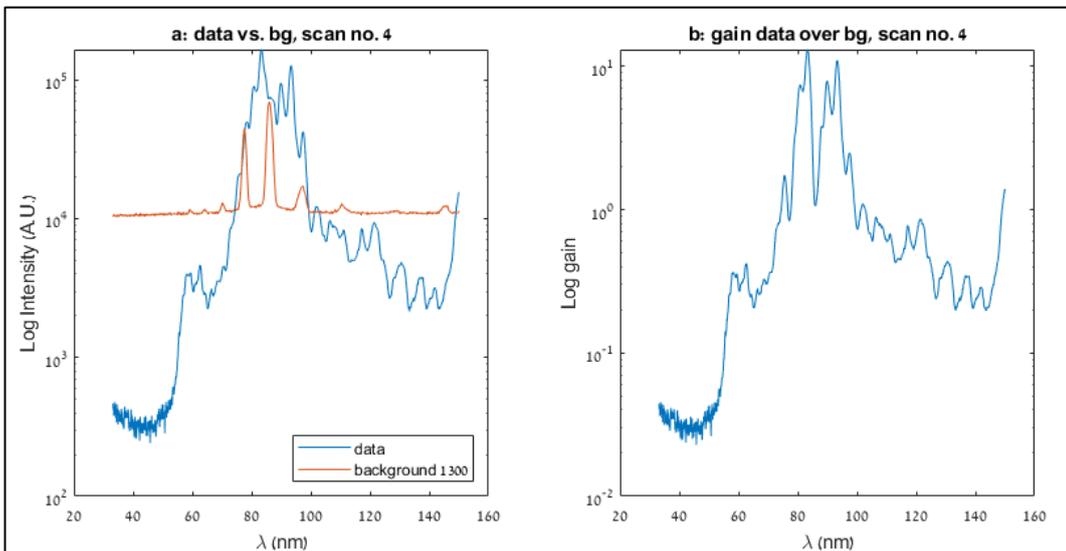
איור 24 : מדידה מס' 1 : עם ובלי התאבכות (a) ויחס ההגברה (b)



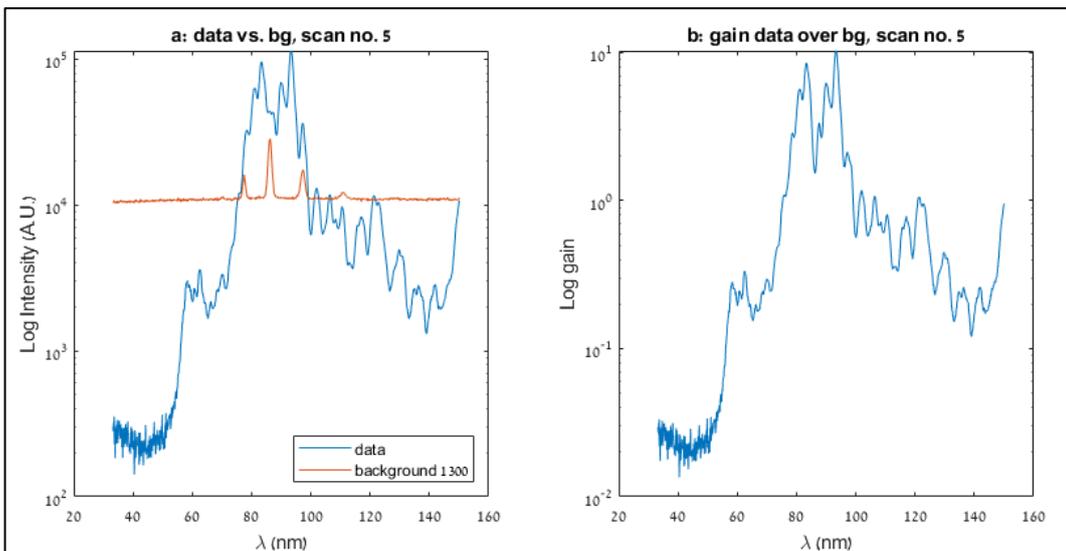
איור 25 : מדידה מס' 2



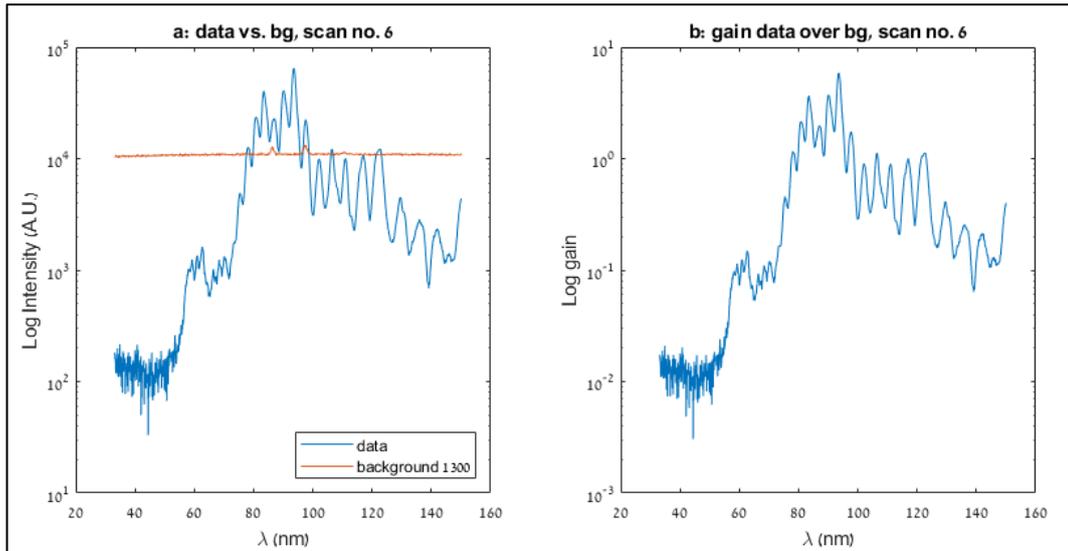
איור 26 : מדידה מס' 3



איור 27 : מדידה מס' 4



איור 28 : מדידה מס' 5



איור 29 : מדידה מס' 6

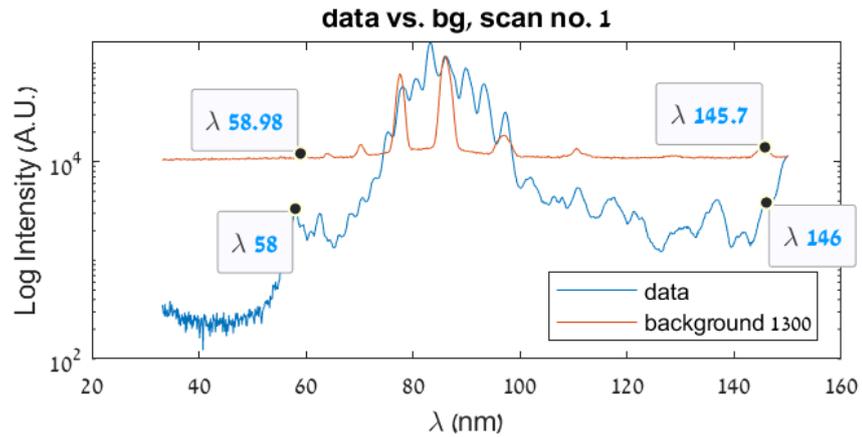
בנוסף לגרפים, חישבנו גם את יחס ההגברה המקסימלי בכל מדידה, ואת האינטגרל של יחס ההגברה על כל הספקטרום הנמדד, וזאת כדי לקבל תחושה ברורה יותר של הגברה – גם של ההגברה המיטבית להרמוניה ספציפית, וגם עבור הגברה הטובה ביותר באופן ממוצע. להלן תוצאות החישובים :

אינטגרל הגברה	אורך גל תואם (nm)	יחס הגברה מקסימלי	פילטר OPA	פילטר Ti:S	מס' המדידה
752.5	83.19	11.86	0.2	1.0	1
346.3	83.19	4.21	0.3	1.0	2
156.0	93.56	1.74	0.4	1.0	3
1106.3	83.3	13.1	0.2	0.6	4
958.7	93.29	10.31	0.3	0.6	5
514.7	93.56	5.88	0.4	0.6	6

טבלה 2 : תוצאות ההגברה לפי מדידה

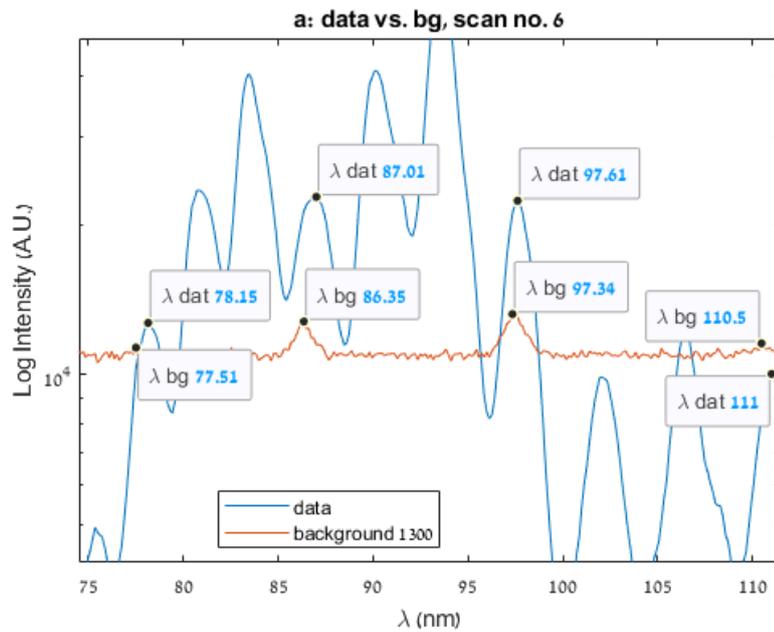
5.4 דיון

מספר דברים עולים באופן ברור מתוך הגרפים : ראשית, למרות שתחום אורכי הגל בו ניתן להבחין בהרמוניות אינו גדל, וההרמוניות המובחנות עדיין מופיעות בין 58nm לבין 145nm , כפי שמודגם באיור 30, אפשר להבחין בהרבה יותר הרמוניות : לפני ההתאבכות ניתן היה להבחין בכ- 4-9 הרמוניות בלבד, ואילו אחרי ההתאבכות מופיעות יותר מ-20.



איור 30 : גבולות אורכי הגל בהם מופיעות ההרמוניות

שנית, ההרמוניות החדשות חופפות בקירוב את ההרמוניות הישנות (כפי שניתן לראות באיור מס' 31), כשבין כל שתי הרמוניות ישנות מופיעות עוד 2 הרמוניות חדשות. כצפוי, אורך הגל של ההרמוניות הישנות אינו נשמר באופן מדויק, ולרוב הן מופיעות באורך גל גדול מעט יותר (יש לציין, מדובר בהפרש של אנגסטרמים בודדים בלבד)



איור 31 : אורכי הגל של ההרמוניות החופפות

שלישית, נציין גם לגבי האות המתקבל מהקרן המקורית ללא ההתאבכות ($1300nm$), שכל שהפילטר חוסם יותר מהקרן, כך האות המתקבל פחות ברור ומספר ההרמוניות נמוך יותר. (בפילטר ה-0.2 ניתן לזהות כ-9 הרמוניות, בעוד בפילטר ה-0.4 ניתן לזהות כ-4 הרמוניות בלבד. לבסוף, נציין גם שבאופן מעניין, גבול העוצמה להבחנה בהרמוניות הרבה יותר נמוך והרבה פחות חד אחרי ההתאבכות, לעומת הגבול הברור מאוד בקרן המקורית, של כ- 10^4 אותו ניתן לראות בכל המדידות. דבר זה מעורר חשד שניקוי ההפרעות והרקע לא היה אופטימלי, או שהתא לא היה אטום מספיק לאור.

לאחר העיון בגרפים, אפשר לחזור ולהתבונן שוב בטבלה מס' 2 ולציין מספר נקודות שמתבררות לאורה.

גם יחס ההגברה המקסימלי וגם האינטגרל על כל יחסי ההגברה בספקטרום משתפרים ככל שהסינון חלש יותר, גם בקרן המקורית ($1300nm$) וגם בהוספת הקרן התוספתית ($800nm$). מתוך הנתונים שלנו קשה מאוד לקבוע או אף להעריך לגבי הסינון של איזו קרן תורם יותר לטיב האות.

לגבי אורך הגל המוגבר ביותר, בכל המקרים מדובר על אחת משתי הרמוניות ספציפיות ($83nm, 93nm$) שאמנם קרובות מאוד להרמוניית המקסימום בקרן המקורית, אך אינן שוות אליה. בבדיקה מקיפה מעט יותר, אפשר לראות שלא מדובר רק על ההגברה המקסימלית, אלא ממש על העוצמה המקסימלית - בכל אחת מהמדידות, העוצמה המקסימלית שהתקבלה אחרי ההתאבכות אינה הרמוניה שהופיעה באות מהקרן המקורי, ולכן זכתה מיידית להיות אורך הגל המוגבר ביותר.

6. מסקנות

לאור האמור לעיל, ניכר שהוספת הקרן של ה- $800nm$ לאות הנכנס שיפרה באופן ברור מאוד את התוצאות המתקבלות: גם מבחינת עוצמת ההרמוניה המקסימלית, גם מבחינת כמות ההרמוניות המובחנות, וגם מבחינת עוצמת הסף לזיהוי ההרמוניות. יותר מזה, ברור שהתוצאות השתפרו באופן המיטבי כאשר השתמשנו במסננים הנמוכים ביותר – 0.2 עבור האות המקורי מה-OPA, ו- 0.6 עבור האות התוספתי שהגיע ישירות מהלייזר.

7. סיכום

בפרויקט זה הצטרפנו למעבדת מחקר באופטיקה, והשתתפנו בעריכת ניסוי תוך שימוש נרחב במערכות ובכלים שבמעבדה. הפרויקט דרש מאיתנו דיוק טכני, חוסר התפשרות על דיוק הניסויים, כתיבת קוד במטלאב, והרחבת ההבנה התיאורטית והמעשית שלנו באופטיקה לא-ליניארית. הצלחנו להראות שהשינוי שהוצע אכן משפר באופן משמעותי את התוצאות המתקבלות ביצירת ההרמוניות הגבוהות, ואף הצלחנו להראות שככל שעוצמת המסננים גדלה, כך התוצאות נפגמות.

ביבליוגרפיה

- Barry D. Bruner, M. K. (2018, april 2). Robust enhancement of high harmonic generation via attosecond control of ionization. *Optics express*, 7.
- Mourou, D' S .(1985) .'Compression of amplified chirped optical pulses ,'Opt. Comm. 56 (3), 219 .(1985) 221—*Optical communication*.219-221 עמ' , (3)56 ,
- Palanker, E. (2018). *Journal Medical*. 379(23), pp. 2267-2269.
- Treacy. (1969). Optical Pulse Compression with Diffraction Grating. *IEEE J. Quant Electron*, 6(9), pp. 454-458.
- W.Boyd, R .(2008) .'*Nonlinear Optics* .New York: Academic Press.

נספחים

1. קוד מטלאב לניתוח המדידות

מדידה של סקירה 6

```

for N=[1:6]

    a=['sc0' num2str(N) '/data/datamat.mat'];
    b=['bg0' num2str(N) '-1300/data/datamat.mat'];
    if (N<4)
        c=['bg01-800/data/datamat.mat'];
    else
        c=['bg04-800/data/datamat.mat'];
    end

    calibration=readtable("MCP_calib_Shimadzu_solids.dat");
    temp=load(a);
    data=temp.datamat;
    clear temp;

    average_set=0;
    for i=[1,2,3]
        average_set=average_set+squeeze(data(:,i,:)/3);
    end

    temp=load(b);
    bg=temp.datamat;
    clear temp;
    average_bg=0;
    for i=[1,2,3]
        average_bg=average_bg+squeeze(bg(:,i,:)/3);
    end

    bg_line=sum(average_bg,1);

    temp=load(c);
    bg800_raw=squeeze(temp.datamat);
    clear temp;

    bg800=0;
    for i=[1,2,3]
        bg800=bg800+squeeze(bg800_raw(i,:)/3);
    end

    frame_sums=sum(average_set,[2,3]);
    [~,zd_num]=max(frame_sums);
    zd_pic=squeeze(average_set(zd_num,:))-bg800;
    zd_line=sum(zd_pic,1);
    lambda=table2array(calibration(501:1500,2));

    figure(N)
    subplot(1,2,1)
    semilogy(lambda,zd_line,lambda,bg_line)
    xlabel('\lambda (nm)')
    ylabel('Log Intensity (A.U.)')
    legend('data','background 1300','Location','southeast')
    title(['a: data vs. bg, scan no. ' num2str(N)])

    subplot(1,2,2)
    semilogy(lambda,zd_line./bg_line)
    title(['b: gain data over bg, scan no. ' num2str(N)])
    xlabel('\lambda (nm)')
    ylabel('Log gain')

    [MaxGain,LambMaxGain]=max(zd_line./bg_line);
    [N,sum(zd_line./bg_line),MaxGain,lambda(LambMaxGain)]
end

```