

השפעת רוחב החיישן על רזולוציית מדידת תבנית ההתאבכות

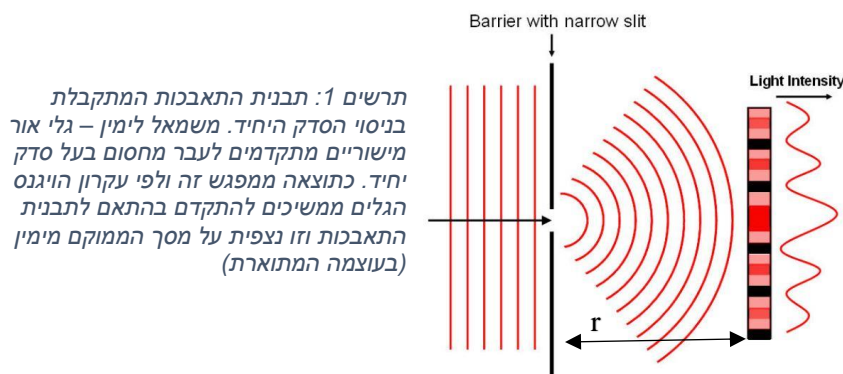
ניר גבריאלוב והדר שרביט

מעבדה ב

במערכת בה מקרינים לייזר העובר דרך סדקים מתקבלת תמונת התאבכות ידועה. במטרה למדוד תופעה זו, משתמשים במכפיל-אור ממוחשב הקולט את כמות האור המגיעה למסך. רזולוציית המדידה קשורה קשר הדוק ברוחב החיישן ובאופן בו הוא ממצע על האור העובר דרכו. מצאנו שמשום שמכפיל האור בעל קוטר גדול יותר מרוחב פסי האור והחושך בתבנית ההתאבכות, המיצוע המתבצע לא ממוקד דיו שהרי הוא ממצע על מקרי התאבכות בונה והורסת לסירוגין המגיעים למסך. כתוצאה מכך, נפגעת רזולוציית המדידה של עוצמת תבנית ההתאבכות ונדרש לתת לה תיקון. תיקון אפשרי הגיע מהוספת סט של צמצמים בעובי שונה על עדשת מכפיל האור. תפקידם למקד את האזור בו נמדדים ערכי העוצמה הנקלטים במכפיל האור, במטרה לחדד את רזולוציית המדידה. לאחר עריכת ניסוי לאישוש התיאוריה הקיימת, ערכנו ניסוי שני המציג את התיקון שלעיל. תוצאות הניסוי המחישו שעבור רוחב צמצם הולך וקטן, רזולוציית המדידה משתפרת והעוצמה הנמדדת מתאימה באופן הדוק יותר לתיאוריה המתוקנת שהצענו, המבטאת את אופי מיצוע מכשיר המדידה על הנתונים. מאמר זה יציג את ניסוי זה

פיתוח תיאורטי

נתאר ניסוי של קרן לייזר מונוכרומטית דקה, אשר עוברת דרך סדק צר ויוצרת תבנית התאבכות. התאבכות הינה תופעה המתארת מפגש של מס' גלים במרחב, באזור המפגש נוצרות תבניות, אשר נובעות מכך שתוצאת המפגש ניתנת לתיאור ע"י סכימת ההשפעות של כל אחד מהגלים הנפגשים. בתרשים (1) ניתן לראות תיאור סכמתי של אופן פעולת המערכת, בה גלי אור נפגשים בסדק ויוצרים תבנית התאבכות על מסך שמולם.



תחילה נניח מקור גל (אל"מ) נקודתי, השדה החשמלי שימדד בנק' כלשהי P כתוצאה ממקור זה נתון ע"י הביטוי:

$$E(P) = \frac{E_0}{r} \sin(\omega t - kr) \quad (1)$$

כאשר E_0 עוצמת המקור, r מרחק מהמקור לנק', $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ תדירות זמנית (T זמן מחזור) ומרחבית (λ אורך גל) בהתאמה.

כדי לנתח את תבניות ההתאבכות, ננתח מערך מקורות אור נקודתיים קוהרנטיים באורך D ובעוצמה אופיינית למקטע ϵ_L . לפי עקרון הוייגנס, כל נקודות אלה בחזית הגל הן מקורות נקודתיים של גלים חדשים. כך נמדוד את עוצמת השדה בנק' P המרוחקת R ממרכז מערך זה. לפי משוואה 1, תרומת השדה של מקטע מקורות באורך dy המרוחק $r(y)$ נתון ע"י:

$$dE = \frac{\epsilon_L}{r} \sin(\omega t - kr) dy \quad (2)$$

המרחק מנק' הדגימה גדול משמעותית מאורך שורת המקורות, $R \gg D$. יחד עם קיום תנאי פראונהופר $R > D^2/\lambda$ כאשר a הוא רוחב הסדק, נוכל לקרב המרחק ממקטע מקורות לנק' הדגימה: $r(y) = R - y \sin \theta + \dots$. התנאי המדויק לקירוב הוא שהסדר הבא בפיתוח זניח. המערכת כעת מקיימת את תנאי פראונהופר לשבירת אור, המחייב כי המרחק r לינארי ב-y. אחרי הצבת הקירוב במשוואה 2 נקבל את הביטוי לעוצמת השדה בנק':

$$E = \frac{\epsilon_L}{R} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} \sin(\omega t - k(R - y \sin \theta)) dy = \frac{\epsilon_L D}{R} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right) \sin(\omega t - kR) \quad (3)$$

כאשר סימנו $\beta = \left(\frac{kD}{2}\right) \sin\theta$. מכאן נגיע לביטוי הסופי לעוצמת הקרינה – נקח את מיצוע השדה בריבוע לאורך זמן מחזור שלם

$$\langle E \rangle_T^2 = I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin\beta}{\beta} \right)^2 \quad (4)$$

כעת נחלק את הסדק לרצועות אורכיות ברוחב אינפיניטסימלי, כך נקבל רצועות דקות של מקורות אור קוהרנטיים, אשר ניתן להתייחס לכל אחת מהם כמקור נק'. כעת קיבלנו שורה של מקורות נק' לרוחב הסדק, וכיוון שאנו ממקמים את המסך במרחק גדול לעומת רוחב הסדק, $(D \leftrightarrow b) R \gg b$, התנאי עבור שורת מקורות מתקיים ונשתמש בתוצאה ממשוואה 4 לתיאור תבנית ההתאבכות שתתקבל עבור סדק צר.

ניתוח ההתאבכות משני סדקים במרחק a דומה ונתון ע"י סופרפוזיציה התוצאות מכל סדק בנפרד. לכן עוצמת השדה בנק' P על המסך:

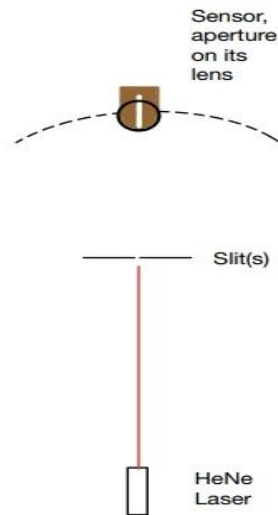
$$E(P) = \frac{\epsilon_L}{R} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sin(\omega t - k(R - y \sin\theta)) dy + \frac{\epsilon_L}{R} \int_{a-\frac{b}{2}}^{a+\frac{b}{2}} \sin(\omega t - k(R - y \sin\theta)) dy \quad (5)$$

ונסיק בצורה דומה את עוצמת הקרינה:

$$I(\theta) = 4I_0 \left(\frac{\sin\beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha \quad (6)$$

כאשר $\alpha \equiv \left(\frac{ka}{2}\right) \sin$

במערכת הניסוי, כיוון שהמרחק בין הסדקים גדול מרוחב כל סדק ($a > b$), תדירות התנודות בעוצמת האור הנובעת מהסדק הנוסף גבוהה מזו של סדק יחיד. מעשית, תתקבל תמונת התאבכות בה ישנה עלייה וירידה משמעותית יותר בעוצמת האור, במרחקים קטנים לאורך צבנית ההתאבכות. תופעה זו הינה חשובה לתיקון התיארוטי אותו נציע מיד.



ההשפעה התיאורטית של רוחב החיישן

מכשיר המדידה (החיישן בתרשים 2) הוא כזה הממצע על עוצמות האור אותו הוא קולט. כפי שתואר, מכשיר זה בעל קוטר גדול יותר מרוחב פסי האור והחושך בתבנית ההתאבכות ועל כן המיצוע אותו הוא מבצע לא ממוקד דיו שהרי הוא ממצע על מקרי התאבכות בונה והורסת לסירוגין המגיעים למסך. כפי שהסברנו, במערכת של שני סדקים צפיפות השינויים מהתאבכות בונה להורסת משמעותי יותר, לכן מתבקש לעבוד בה. נציע תיקון שמתחשב שאופן המיצוע לעיל. נגדיר קטע A ועוצמה I' הפועלת בהתאם לקשר (6) אך דוגמת ערכים בטווח A . טווח A מבטא ערכים משמאל ומימין לזווית הנמדדת בהתאם לרוחב הצמצם. כלומר, לכל זווית θ נמצע על ערכים בין גבולות הצמצם (שאורכו הוא בקירוב $\frac{s}{r}$)

כלומר הקטע A הוא $A = \left[\alpha - \frac{s}{2r}, \alpha + \frac{s}{2r} \right]$ נחשב את העוצמה החדשה I' כמיצוע על ערכים בקטע זה עבור רוחב סדק a , רוחב צמצם s , מרחק הסדק מהצמצם r , מספר גל k ומרחק בין סדקים b . ובעזרת קשר (6) נגיע למשוואה חדשה (7).

נציין שקשר (7) מתקיים תחת ההנחה שרוחב הצמצם הוא בקירוב אורך הקשת שנפרשת על ידי α כלומר $s \approx r d\alpha$ ולכן גם $d\alpha = \frac{s}{r}$. הנחה זו נובעת מכך שרוחב הצמצם s קטן משמעותית מהמרחק בין מקור הלייזר לצמצם ($s \ll r$).

תרשים 2: מערכת הניסוי. בניסוי ממוקמים לייזר הליום ניאון ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), מסך עם סדקים ברוחב שונה ומכפילאור בקו ישר. המכפילאור חופשי לנוע לאורך קשת, כך שיוכל להיות ממוקם בזוויות שונות ביחס לאנך. זוויות נמדדה בעזרת מתח במעגל חשמלי, בו נגד משתנה אשר התנגדותו נובעת מזווית המכפילאור. מתח זה, והמתח הנמדד כתוצאה מהאור הנכנס הוזנו למחשב וכך נאספו הנתונים.

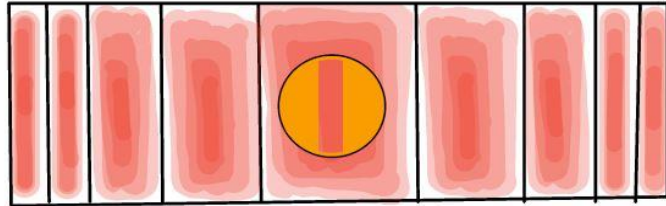
$$I'(\alpha) = \frac{r}{s} \int_{\alpha - \frac{s}{2r}}^{\alpha + \frac{s}{2r}} I_0 \cdot \text{sinc}^2 \left(\frac{ka}{2} \cdot \sin \alpha' \right) \cos \left(\frac{bk}{2} \sin \alpha' \right) d\alpha' \quad (7)$$

זהו הפיתוח המרכזי בניסוי ובעזרתו נחליץ התאמות חדשות.

מהלך הניסוי

מיקמנו את מערכת הניסוי כפי שמתואר בתרשים 2. לצורך ניסוי זה, השתמשנו באותה מערכת סדקים – 2 סדקים ברוחב 0.04mm אשר מרוחקים 0.5mm זה מזה. עבור כל מדידה, מיקמנו צמצמים ברוחב 0.35mm , 0.1mm מ"מ בפתח החיישן והסענו את המכפילאור לאורך הקשת, בין 5° – ל 5° .

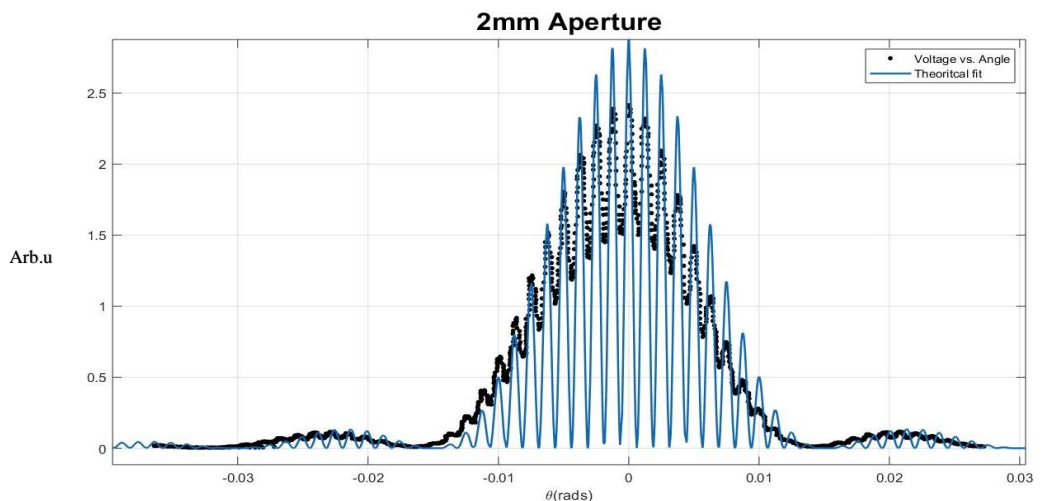
תרשים 3: תבנית התאבכות עבור סדק יחיד. בגוון אדום – עוצמת האור ההולכת ופוחתת. בשחור – פסים בהם אין אור (התאבכות הורסת). בכתום – קולטן ועליו צמצם (בעל עובי s)



בתרשימים (4) ו-(5) ניתן לראות את תוצאות ניסוי זה, יחד עם ניסיון התאמתם לתיאוריה. המגמה ברורה – ככל שרוחב הצמצם צר יותר, אוסילציות העוצמה I משמעותיות יותר – דבר המעיד על רזולוציית מדידה גבוהה יותר. דיוק הרזולוציה נובע ממיצוע על מקטעים (ראה מקטע A בפיתוח התיאורטי) הולכים וקטנים, אשר ממחישים מדידה שממצעת על ערכי עוצמה המתאימים לתבנית התאבכות אחת (אור בלבד או חושך בלבד). במילים אחרות, ככל שרוחב הצמצם צר יותר, כך גודל העוצמה הנמדדת הוא מדד לעוצמה עבור זווית α קטנה במיוחד שלא גורמת למיצוע על עוצמות שמקורן בנקודות רחוקות בתבנית ההתאבכות. נמחיש באמצעות דוגמא כללית – עבור צמצם בעל רוחב s הממוקם על קולטן, מיצוע האור שנופל תחת s איננו מיצוע של מאורעות התאבכות בונה (אור) בלבד (ראה תרשים 3), ומכיל גם מקרים אחרים (מקרי ביניים או מקרי התאבכות הורסת). לכן, מקרי התאבכות בונה נצפים לנו כבעלי מתח נמוך יותר משמתאים להם ומקרי התאבכות הורסת נצפים כבעלי מתח גבוה יותר משמתאים להם, כי המתח שנמדד בהם איננו בעל ייחוס בלעדי לנקודה ספציפית בתבנית ההתאבכות. לאור הבנה זו, נציע תיקון לתיאוריה המתחשב במגבלות המדידה. ניקח אוסף של נקודות המתאימות לקשר (6) הנופלות בטווח הצמצם ונמצע עליהם. מיצוע זה יהווה בעבורנו את ערך הזווית הנמדדת ויחדד את הרזולוציה של הערך שנמדד בפועל. האינטגרל אינו פתיר אנליטית, לכן יחושב נומרית ואת התוצאה נשווה למדידות מהניסוי. כעת, מכיוון שערך עוצמת האור בכל זווית מחושב ע"י ממוצע האור בזוויות הסמוכות לה, נצפה לתנודות פחות חדות בעוצמת האור. לדוג' עבור זווית מסוימת בה אין אור כלל במרכז הצמצם, התיאוריה המקורית תצפה לעוצמה 0, אך (בהנחה כי יש נכנס אור בזוויות סמוכות) בשל המיצוע התיקון יבא עוצמת אור גדולה מ-0. להלן תוצאות המדידה עם הצמצם העבה ביותר (2mm). ההתאמה התבצעה בהתאם לקשר התיאורטי של משוואה (6), וזאת עבור משתנים חופשיים a, b המייצגים את רוחב הסדקים והמרחק בניהם בהתאמה.

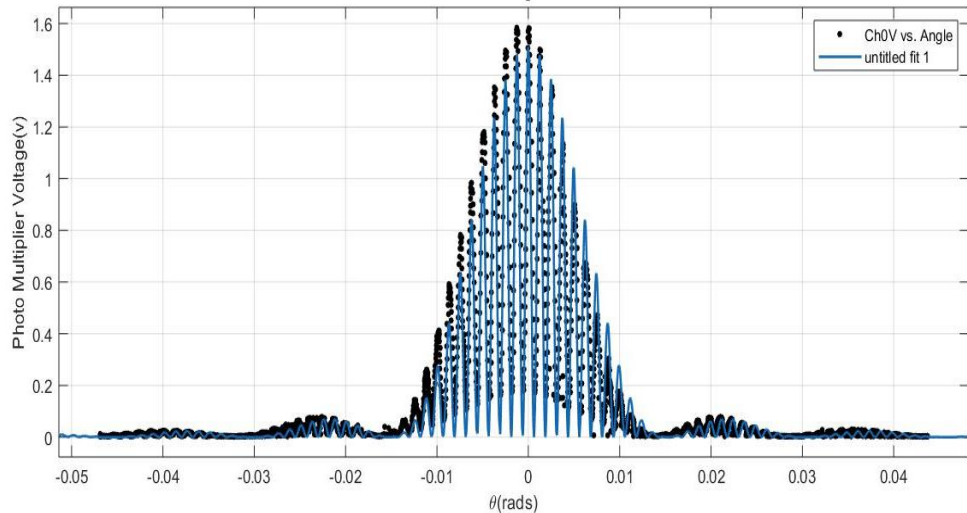
תרשים 4:
בכחול – התאמה לתיאוריה לפי קשר (6)

בשחור – ערכי המדידה במקרה בו רוחב הצמצם הוא 2mm . ניתן לראות בבירור שערכי העוצמה לא מגיעים ל-0. זאת משום שברוחב הצמצם מוכלים אוסף גדול של מאורעות התאבכות מעורבים (בונה/הורסת/שילוב של השניים) והמיצוע על כולם משנה משמעותית את העוצמה הנמדדת



מדידה נוספת היא עם צמצם צר יותר:

0.1mm Aperture



תרשים 5:

בכחול – התאמה לתיאוריה לפי קשר (6)
בשחור – ערכי המדידה
במקרה בו רוחב הצמצם הוא 0.1 מ"מ
רזולוציית המדידה השתפרה משמעותית.
העוצמה מגיעה לערכים נמוכים הרבה
יותר. עם זאת, היא אינה מגיעה לאפס.
הסיבה היא שרוחב הצמצם אמנם ממצע
על פחות מקרי התאבכות מעורבים אך בכל
זאת ממצע על אוסף לא אחיד כלשהו של
ערכים.

אמנם, הקטנת רוחב הצמצם שיפרה את רזולוציית המדידה ונוכל למדוד את ערכי a ו b המתקבלים מהתוצאות. אנו יודעים כי הפונק' $\text{sinc}^2(\beta)$ מקבלת נק' מינימום (הקרובות ביותר לראשית) כאשר $\beta = \pi$, כלומר כאשר $\sin \theta = \frac{\lambda}{b}$ (נובע מהגדרה $\beta \equiv \frac{2\pi b}{2\lambda} \sin \theta$). באופן דומה, התנודות של הפונק' $\cos^2 \alpha$ יקבלו מקס' ראשון בקרבתו לראשית כאשר $\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$. מצאנו נק' אלו במדידות ומהן חישבנו את רוחב הסדק והמרחק בין הסדקים.

Aperture(mm)*	Width(μm)*	Space(μm)*
0.10 ± 0.02	41.0 ± 4.4	504 ± 16
0.35 ± 0.02	41.4 ± 4.4	506 ± 16
2.00 ± 0.02	40.8 ± 4.4	508 ± 16

*פירוט חישוב שגיאות ניתן לראות בנספח 1.

ניתן מדד לדיקו המדידה בהתחשב בשגיאות ביחס לגדלי המערכת

$$width_{measured} = 40 \pm 10 [\mu\text{m}], space_{measured} = 0.5 \pm 0.1 [\text{mm}]$$

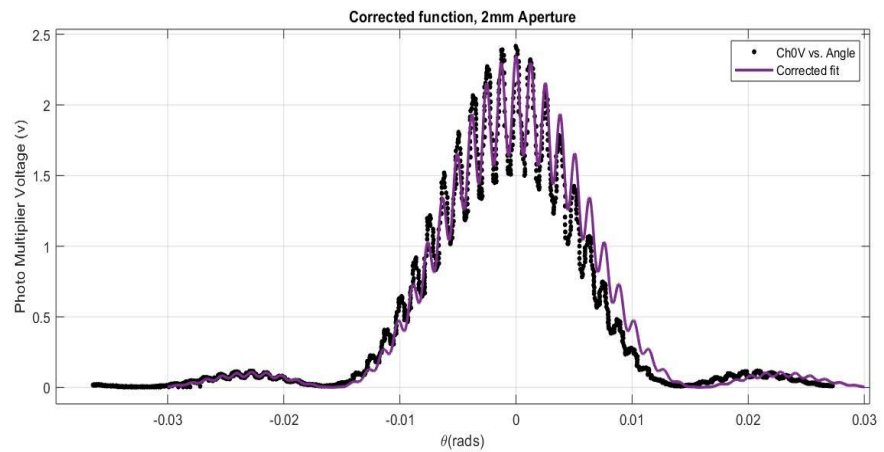
Aperture(mm)	$N_\sigma(width)$	$N_\sigma(space)$
0.10	0.09	0.04
0.35	0.13	0.06
2.00	0.07	0.08

למרות שתוצאות המדידה קרובות לתיאוריה, ניתן לראות בבירור שנדרש תיקון שהרי ההתאמה בתרשימים (4) ו(5) איננה מדויקת. נציין שגם עבור התיקון שיופיע בחלק הבא נצפה לקבל תוצאות מדידה דומות עבור a ו b . הסיבה לכך היא כי מדידות אלה תלויות בקור' θ בלבד. (רוחב הסדק הוא ביטוי לרוחב פונקציית sinc ואילו המרחק בין הסדקים הוא ביטוי לרוחב אוסילציות ה- \cos). והתיקון המוצע, שנובע ממיצוע על ערכי העוצמה - I , לא משנה את רכיבי θ של הנקודות.

אם כך, נפנה לתיקון

נציג כעת את הגרפים המתוקנים עבור שלושה סדקים בעובי שונה, יחד עם גרף המגיע מהקשר התיאורטי לו ציפינו (ראה משוואה 7)

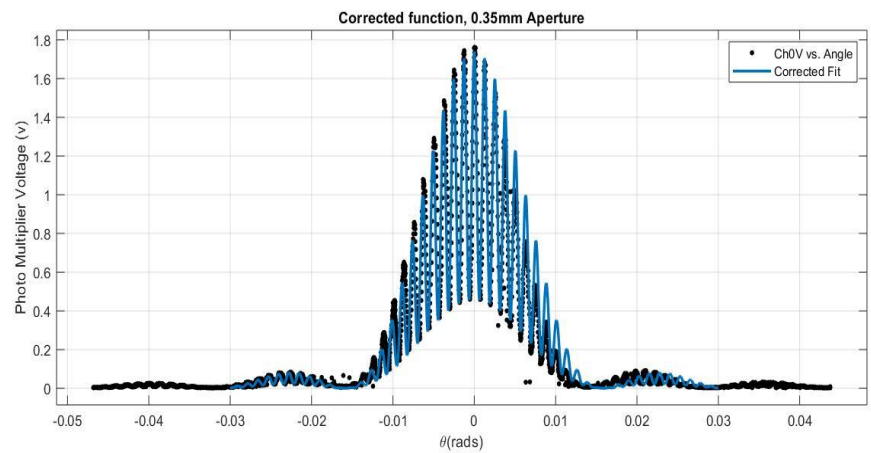
סדק בעובי 2 מ"מ:



תרשים 6:

בסגול – התאמה לתיאוריה לפי קשר (7)
בשחור – ערכי המדידה
כעת ניתן לראות שההתאמה לתיאוריה מדויקת יותר. כלומר, גם בקשר התיאורטי מיצוע ערכי העוצמה בטווחי רוחב הצמצם משמעותה פונקציה שאיננה דועכת עד לערך 0 כפי שנצפה לפי קשר (6)

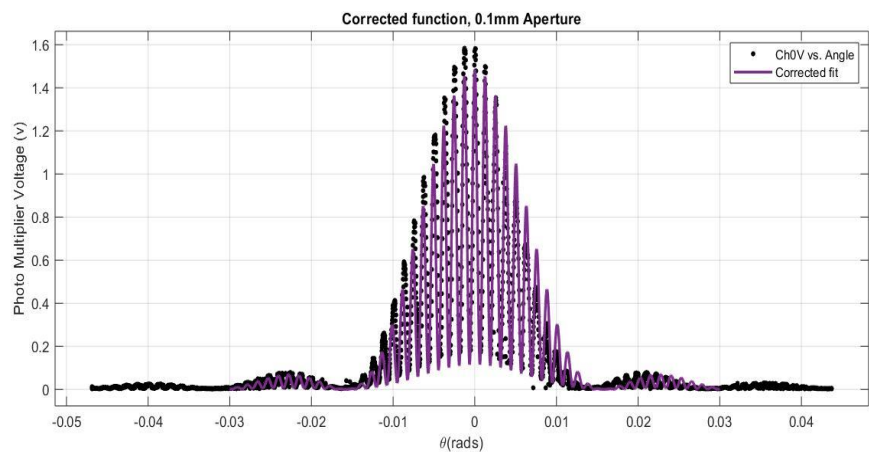
סדק בעובי 0.35 מ"מ:



תרשים 7:

בכחול – התאמה לתיאוריה לפי קשר (7)
בשחור – ערכי המדידה
כעת המיצוע מתבצע על פחות מקרי התאבכות מעורבים ולכן כפי שיצא בניסוי האוסילציות על העוצמה עמוקות יותר.

סדק בעובי 0.1 מ"מ:



תרשים 8:

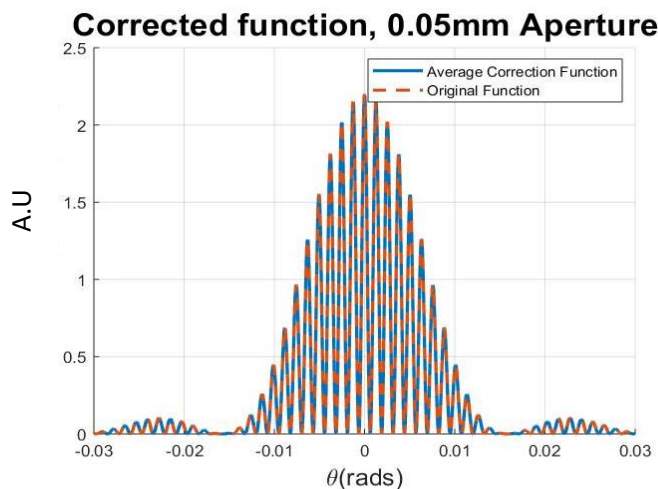
בסגול – התאמה לתיאוריה לפי קשר (7)
בשחור – ערכי המדידה
עבור הצמצם הצר ביותר רזולוציית המדידה היא הגבוהה ביותר והמיצוע על העוצמה מתבצע על קטע A קטן, זוהי המדידה הקרובה ביותר ל(6) שהרי אינטגרציה על מקטע זווית קטן במיוחד היא קירוב טוב לערך הזווית באמצע הקטע

קיבלנו תוצאות מדויקות, התואמות לתיאוריה המתוקנת שהצענו. טענה זו נראית בבירור בתרשימים 6-8, בהם מיצוע על ערכי הזווית עבור רוחב צמצם הולך וקטן הביאה לכך שאוסילציות העוצמה הגיעו באופן הולך וגדל עד לציר ה-x, והמחישו בכך את הדיוק הנרשם ברזולוציית המדידה. מעבר לכך, נוכל לתת כימות לאיכות המדידה על ידי השוואת ערכי נקודות המינימום הראשונות מימין, כאשר נצפה לערך מינימלי קטן יותר עבור עובי צמצם קטן יותר.

עובי סדק/ערך המינימום (ביח' ארביטראריות)	0.1 מ"מ	0.35 מ"מ	2 מ"מ
ניסוי	1.60	0.45	0.18
תיאוריה	1.70	0.46	0.19

ההתאמה לנתונים השתפרה משמעותית. לצורך השוואה, נזכור שערך המינימום התיאורטי עבור קשר (6) מהניסוי הראשון היה 0 – רחוק מאוד מתוצאות הניסוי. זאת ראינו בבירור תרשימים (4) ו (5). לעומתה, קשר (7) והתרשימים (7) ו-(8) שלעיל קרובים משמעותית לערכים שנמדדו והמדד הברור ביותר לכך הוא, כאמור, ערכי המינימום שנמדדו לעיל. מכאן נגיע למסקנה המתבקשת – קשר (7) הוא תיאור מדויק יותר מקשר (6) למערך הניסוי הנ"ל ולעובי הצמצם יש בהחלט השפעה על תוצאות הניסוי.

תוצאות הניסוי הראו, כי למרות שהתיאוריה המקורית מספיקה עבור חישוב ערכי הסדק, נותר פער משמעותי לפונק' המודל (משוואה 6). משרעת התנודות בעוצמת האור שנכנס, לא "ירדה לאפס" ועלתה חזרה כפי שצופה המודל, אלא ביצעה תנודות במשרעת קטנה יותר מהמצופה. לכן הצענו מודל מתוקן, הטוען כי מכיוון שקוטר העדשה גדול מרוחב אופייני בתבנית ההתאבכות, המתח הנמדד בכל זווית תלוי גם באור המתקבל מזוויות הסמוכות לו ויש להתחשב באור הנכנס מכלל טווח זוויות זה. במודל המתוקן שהצענו, המתח בכל זווית θ יחושב ע"י ממוצע על כל המתחים בזוויות הסמוכות לה (ועדיין קטנות מרוחב הצמצם) בהם נכנס אור לעדשה. תוצאות הניסוי הראו כי השערה זו הצליחה לנבא טוב יותר את תוצאות הניסוי. ניתן לראות כי הערך בנק' המינימום בתנודות שחזה המודל המתוקן התאימו משמעותית יותר טוב לאלו שהתקבלו מעשית בניסוי.



תרשים 9: חישוב נומרי של פונק' הממוצע עבור צמצם תיאורטי ברוחב 0.05 מ"מ, אל מול התוצאה המתקבלת מהפונק' המקורית. כפי שניתן לראות, נומרית, שני הגרפים ממש מתלכדים אחד עם השני, כך שבניסוי עם צמצם שכזה נצפה להתאמה גבוהה מאוד לפונק' המקורית.

כדי לבדוק בצורה נוספת את איכות המודל, נציע לבדוק האם נצליח לתאר נכון מערכת ניסוי בה רוחב הצמצם קטן עוד יותר. בתרשים 9 מוצגת תוצאתו של חישוב נומרי של צמצם תיאורטי צר בעובי 0.05 מ"מ. ניתן לראות, עבור רוחב צמצם זה (או כל צמצם צר יותר), ומערכת הסדקים שנבדקה בניסוי, שהתוצאות יתאימו לחלוטין לקשר המקורי עבור תבנית ההתאבכות המתואר במשוואה 9. נבצע ניסוי בו נמקם צמצם ברוחב המתאים (או אף נמוך ממנו) ממול פתח העדשה ונצפה, לפי המודל שתיארנו בניסוי זה, כי התוצאות יתאימו איכותית לפונקצייה המקורית אותה הצגנו, ללא המיצוע.

נספח 1 – חישוב שגיאות

- א. רוחב הצמצם: את רוחב הצמצם מדדנו בעזרת מד מרווח ידני, אשר המרווח הקטן ביותר בו היה $0.05mm$, לכן השגיאה שחושבה הייתה כשליש מגודל זה, כלומר $\Delta = 0.02mm$
- ב. ערכי הסדקים מהתוצאות את שניהם חישבנו בצורה דומה, אנו יודעים מפונקציית המתארת את תבנית ההתאבכות, כי התאפסות ראשונה של הפונק' תהיה כאשר $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{b}$, מצאנו נק' זו בגרף התוצאות שהתקבלו. בצורה דומה, המקסימום המקומי הקרוב ביותר למקסימום בראשית הינו כאשר $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$. כיוון שמכשירי המדידה לוקחים דגימות בדידות, הנק' הרלוונטית יכולה להיות בין 2 נק' דגימה סמוכות, אך לא נמדדה במדויק. לכן הערכנו שגיאה זו (עבור α), כחצי המרחק בין 2 הנק' המקסימליות הרלוונטיות, $\Delta \sin(\theta) = 1e - 5$. עבור נק' המינימום, ממנה חישבנו את רוחב הסדק המצב מעט שונה, כיוון שהרבה נק' סמוכות קיבלו ערך מינימלי 0. לכן הערכנו טווח שגיאה של גודל זה, בחצי מאורך שרשרת נק' זו, $\Delta \sin(\theta) = 3e - 5$. מכאן, חישוב השגיאה בנתונים הנדרשים, שהם פונק' של נק' אלו שמצאנו בגרף, לפי התקדמות שגיאות:
- $$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{b} \rightarrow \Delta b = |-\lambda \cdot \cot(\theta_0) \cdot \csc(\theta_0) \cdot \Delta \theta|$$
- ג. ערכי הסדקים הנתונים לפי פירוט היצרן והמידע שניתן במעבדה. כאשר θ_0 הזווית בה נמצאת נק' המיני/מקס' ולפיה חישבנו את המרחק בין הסדקים או רוחב הסדק.