

האוניברסיטה העברית בירושלים
הפקולטה למתמטיקה ולמדעי הטבע
המחלקה לפיסיקה יישומית

**מעבר אנרגיה/מטען ברכיבים ננו-
היברידיים רב שכבתיים**

אבנר נויבואר

בהדרכת: ד"ר יוסי פלטיאל

עבודת גמר לתואר מוסמך במדעי הטבע

אפריל 2012

ניסן תשע"ב

עבודה זו מוקדשת למרגלית אשתי, נטע ועמר ילדיי.
למרגלית, תודה על התמיכה לאורך כל הדרך או כפי שהגדירה זאת: "שלוש שנים אני סוחבת את
התזה ה-@#\$@ שלך על הגב שלי", בלעדייך לא הייתי עושה זאת.
לכנופיה שלי, תודה שלימדתם אותי את ההבדל בין עיקר לטפל.

תודות

תחילה אודה להורי על התמיכה וההכוונה לאורך שנות חיי, בכך נתנו לי את הכלים לחיות את חיי על פי דרכי בכלל וללמוד בפרט.

מחקר זה נעשה תחת הנחייתו של יוסי פלטיאל. ארצה להודות לו תחילה על נתינת ההזדמנות ובהמשך על השילוב בין הדרכה אישית ונתינת מרחב חשיבה עצמאית. כמו כן על עזרה במישור המחקרי ובמישור האישי כשהייתה נחוצה.

תודה מיוחדת לשירה יוכילס מחד על העזרה המקצועית והנחייה במבוכי המחקר, מאידך על הסבלנות ואוזן קשבת לגבי כל שאר הנושאים בעולם.

על ההדרכה והעזרה בכל הנושאים הקשורים ל SEM אשר היה כלי מדידה עקרי במחקרי תודה רבה לאבי בן חור.

הננו חלקיקים שבהם השתמשנו סונתזו ואופיינו במעבדה של פרופסור אורי בנין, תודה לו ולאנשי מעבדתו על כך ועל האפשרות לעבוד במעבדתו.

תודה אחרונה לשמעון אליאב וצוותו מהמרכז ננו של האוניברסיטה העברית על עזרה מתמדת ופתרון בעיות בשמחה.

תקציר

ההתקדמות הטכנולוגית של השנים האחרונות הביאה עמה ירידה בגודלם של הרכיבים המיוצרים עד לגדלים ננו-מטריים. טבעי שהמשך התקדמות תתבצע באמצעות מחקר של מבנים ננו- מטריים שונים כמו ננו חלקיקים (Quantum dots). ניתן להגדיר מבנים ננו-מטרים אלו כ"אטומים מלאכותיים" אשר תוחמים את נושאי המטען בתוכם בשלושת המימדים המרחביים. תכונותיהן האופטיות והחשמליות של הננו חלקיקים נקבעות על ידי גודלן והרכבם, כך ששליטה בפרמטרים אלו מהווה בסיס חשוב לשימוש בננו חלקיקים. ההתפתחות כוללת רכיבים המבוססים על סידור עצמי (Self assembled (SA) של ננו חלקיקים על גבי מצעים שונים בעזרת מולקולות אורגניות. נושא מרכזי ברכיבים מהסוג הזה הוא היכולת לפתח שיטות מדידה המאפיינות את הרכיב.

אנו חוקרים רכיבים ננומטרים המערבים מולקולות אורגניות וננו חלקיקים. היכולת לשלוט ברכיבים ההיברידים תלויה במעבר מטען בין הננו חלקיק למצע דרך השכבה האורגנית. במחקר זה פיתחנו גלאי רגיש לאור המושתת על טרנזיסטור (FET (Field effect transistor, שהשער שלו מבוסס על בליעת אור. הגלאי הוא בעל שכבה אורגנית מסודרת המשמשת כמקשרת בין הננו חלקיקים לפני הטרנזיסטור במקום השער בטרנזיסטור $GaAs / AlGaAs$ רגיל.

כאשר הננו חלקיק בולע אור, בתדירות המתאימה לרזוננס שלהם, מתקבל שינוי בפוטנציאל האלקטרו-כימי שלהם. שינוי זה מוביל לוריאציות בפוטנציאל האלקטרוסטטי בין שכבת הננו חלקיקים לשכבת ההולכה בטרנזיסטור ובכך הננו חלקיקים משמשים כשולטים בשער הפעיל. אנו בוחנים את תגובת הגלאי תחת שינוי פרמטרים כמו המולקולות האורגניות, גודל והרכב הננו חלקיקים.

את מעבר המטען לפני השטח של הרכיב חקרנו על ידי שימוש במדידות Cathodoluminescence (CL), מדידות אלו התאפיינו בפיק צר תחת תנאים הנכונים. הפיק הרזוננטי הצר נמצא רגיש לסוג המצע ומצבי האנרגיה בהן, גודל הננו חלקיקים והמולקולות האורגניות המקשרות בניהם. אנו מצעים מודל פשוט המייחס את פיק ה-CL למעבר מטען רזוננטי מננו חלקיק טעון למצבי אנרגיה במצע. לפי מודל זה מדידות ה-CL מאפשרות למפות מעבר מטען ברכיבים מעורבים.

V	תודות
VII	תקציר
IX	תוכן עניינים
1	1. מבוא ורקע תיאורטי
1	1.1 הקדמה
2	1.2 מוליכים למחצה
2	1.2.1 תכונות כלליות
3	1.2.2 גליום ארסניד
5	1.2.3 רמות אנרגיה של מאלחים בגליום ארסניד
6	1.3 התקני GaAs/AlGaAs בעל מוליכות גבוהה
6	1.3.1 התקנים המבוססים מבנים מורכבים
7	1.3.2 טרנזיסטור בעל מוליכות גבוהה HEMT
8	1.4 מולקולות אורגניות
8	1.4.1 התארגנות עצמית של מולקולות
9	1.4.2 סוגים שונים של מולקולות אורגניות
10	1.5 ננו חלקיקים
10	1.5.1 תכונות כלליות של ננו חלקיקים
11	1.5.2 תיחום קוונטי ואנרגיות בננו גבישים של מוליך למחצה
11	1.5.2.1 הגדרת אקסיטון
12	1.5.2.2 מודל "חלקיק בקופסא"
14	1.6 טרנזיסטור HEMT בעל שער אופטי מננו חלקיקים
16	2. מערכת ניסיות ושיטות מדידה
16	2.1 מערכות אפיון
16	2.1.1 SEM
16	2.1.2 AFM
17	2.2 מערכות מדידה
17	2.2.1 נְהֻרָנוּת קתודית (Cathodoluminescence (CL))
18	2.2.2 מערכת מדידה חשמלית
19	2.3 הכנת ואפיון הדגמים
19	2.3.1 תהליך הכנת טרנזיסטור בליטוגרפיה
20	2.3.2 תהליך הספיחה של השכבה האורגנית וננו חלקיקים

22	3. תוצאות ודיון
	3.1 אפיון ובדיקת מעבר מטענים בטרנזיסטור בעל שכבת ננו חלקיקים
22	בודדת.....
22	3.1.1 אפיון דגמים.....
	3.1.2 אפיון תצורת השכבות על ידי ניסוי של שינוי עוצמת
24	ההארה.....
26	3.1.3 בדיקת מעבר מטענים בעל שכבת ננו חלקיקים בודדת.....
27	3.2 מדידה חשמלית ואופטית על התקנים רבי שכבות.....
28	3.3 מדידות מקומיות של מעבר מטען בעזרת CL.....
34	4. סיכום ומסקנות
35	5. עבודה עתידית
35	5.1 מדידות של טעינת ופריקת ננו חלקיקים באמצעות CL.....
36	5.2 מדידות מעבר מטען דרך ננו חלקיקים בהזרקה ישירה.....
37	5.3 מדידות אפקט הול.....
38	נספחים
38	נספח א: מודל חלקיק בבור פוטנציאל כדורי אינסופי.....
41	נספח ב: הליך הכנת טרנזיסטור HEMT
42	נספח ג: ספיחה על גבי סילקון.....
43	בביוגרפיה
48	Abstract

1. מבוא ורקע תיאורטי

1.1 הקדמה

הגדרת מבנים ננו-מטריים נובעת מתוך מספר המימדים המרחביים בהם יכולים נושאי המטען לנוע בחופשיות, כאשר מבנים אלו יכולים להיות ממוליך או מוליך למחצה. הגבלת התנועה של נושאי המטען יכולה ממימד אחד ועד שלושה, תחום ההגבלה הינו מסדר הגודל של רדיוס בוהר של האקסיטונים כך שמתרחשת תחימה קוונטית של פונקציות הגל של נושאי המטען. בגלל התחימה משתנות פונקציות צפיפות המצבים של נושאי המטען מגביש, דבר המוביל לשינוי בספקטרום האנרגיה שלהם. כליאה של פונקציות הגל האלקטרוניות בכל שלושת המימדים מגדירה את *הננו חלקיק (Quantum dots – QDs)* ניתן להגדיר אותם כ "אטומים מלאכותיים"¹⁻³. השימוש בננו חלקיקים בהתקנים יישומיים יוצרות עניין רב בגלל היכולת לשלוט בגודל, בצורה ובהרכב שלהן⁴ ובכך לקבוע את תכונותיהן האלקטרוניות והאופטיות. התכונות של הננו חלקיקים שתיארנו עד כה מאפשרות להשתמש בננו חלקיקים בהתקנים יישומיים בתחומי אנרגיית שמש,⁵

⁶ אלקטרו אופטיקה,^{7,8} ומידע קוונטי.⁹

כפי שהזכרנו התכונות הקוונטיות של הננו חלקיקים ניתנות לניצול בתחום האלקטרו-אופטי, נראה זאת במחקרנו. במחקר זה אנו ננסה לשלב בין הננו חלקיקים לבין רכיב אלקטרוני נפוץ, טרנזיסטור מוצא שדה (FET) (Field effect transistor). כידוע הטרנזיסטור הוא רכיב בו זורם זרם מהמקור (source) לשפך (drain) בעקבות מקור מתח, זרם זה נשלט גם על ידי מקור חיצוני דרך ה"שער" (gate) הגורם לפתיחה/סגירה של תעלת ההולכה. שינוי עובי תעלת ההולכה נקבע על ידי הפוטנציאל החשמלי על פני השער, לכן עבור שינויים קטנים בפוטנציאל נדרש טרנזיסטור רגיש כמו *High Electron Mobility Transistor (HEMT)*. בטרנזיסטור זה תעלת ההולכה היא שכבה של אלקטרונים הכלואה בשני מימדים (*2-D electron gas (2DEG)*) כך שהניידות (mobility) שלהם גבוהה יותר משל נושאי מטען בFET.^{10,11} השילוב בין הננו חלקיקים לטרנזיסטור יתבצע על ידי ספיחה כימית של הננו חלקיקים על גבי הטרנזיסטור בעזרת מולקולות אורגניות היכולות לקשור הן למצע והן לננו חלקיקים. בחירת המולקולות אורגניות תעשה על פי הננו חלקיקים והמצע שעליו נרצה לספוח.

אחת התכונות של הננו חלקיקים היא שספקטרום בליעת האור שלהם נקבעת על פי גודלם הפיזי. ניתן לנצל את תכונה זו על ידי הארה על הגלאי ויצירת אקסיטונים (Exciton) בננו חלקיקים. מהננו חלקיק יעבור נושא מטען/אנרגיה אל פני הטרנזיסטור ובכך ישפיע על הזרם בתעלת ההולכה.¹² תהליך זה אשר יוסבר בפירוט בהמשך מעיד על זיהוי האור הנבלע על ידי הטרנזיסטור ועל פעולתו של הגלאי.

תכונה נוספת של הננו חלקיקים שאותה אנו ננצל לחקירת מעבר המטען היא היכולת של שלהם לפלוט פוטון בעקבות שיחבור (recombination) של האקסיטון. השימוש בהארה לשם עירור אנרגטי (*Photoluminescence (PL)*) נעשה במחקרים רבים. לעומת זאת ההארה ועירור על ידי קרן אלקטרוניים (*Cathodoluminescence (CL)*) פחות נפוצה. ישנם מספר הבדלים בין שתי סוגי המדידות כאשר העקרוניים הם עוצמת הקרן ומיקודה. הבדלים אלו גורמים לתוצאות שונות

בשני המקרים בפליטה של הננו חלקיקים תחת תנאים מסוימים. אנו נציג את הבדלים אלו ומודל המסביר אותם.

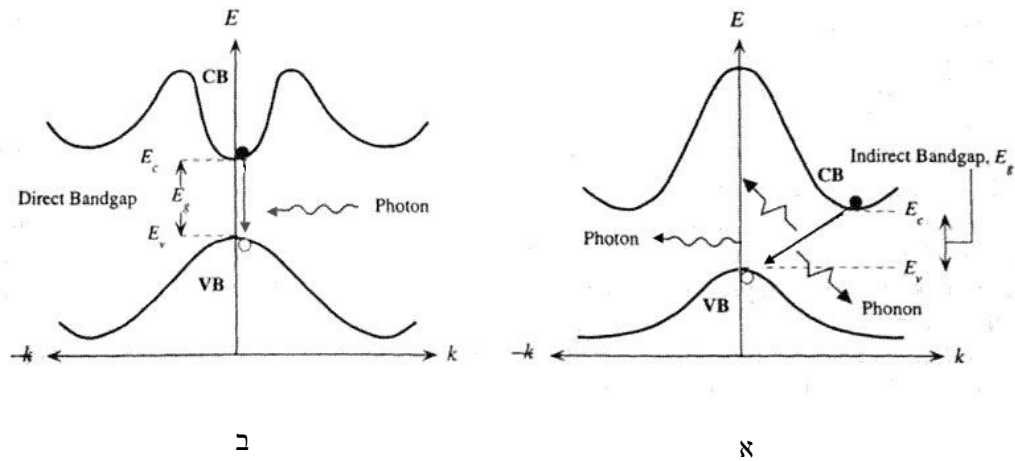
שילוב התוצאות החשמליות והאופטיות שנמדדו בטמפרטורת החדר מספקות תמונה על מעבר מטען/אנרגיה מהננו חלקיק למצע דרך השכבה האורגנית.

1.2 מוליכים למחצה (Semiconductor)

1.2.1 תכונות כלליות

מוליכים למחצה הינם מבודדים אשר באמצעות אילוח או חימום ניתן להגיע למוליכות חשמלית שהיא בין מוליכות של מתכות (טובה) לבין מוליכות של מבודדים מושלמים (גרועה). ההתנגדות החשמלית של מוליכים למחצה נעה בין הערכים $10^{-3} - 10^3 \Omega cm$ כך שהם יכולים להיות מוליכים טובים מחד גיסא ומאידך גיסא כמעט מבודדים. המצע השמיש ביותר בתעשייה כיום הוא הסילקון (Si). על גבי מצע (Substrate) זה נבנים ההתקנים כגון: טרנזיסטור, דיודה ועוד. סוג נוסף של מוליך למחצה הוא בעל מבנה תרכובת (Compound structure) המבוסס על שני יסודות ויותר כדוגמת גליום ארסניד (Gallium Arsenic (GaAs)). בעבודה זו אנו נשלב נקודות קוונטיות עם התקנים של מוליכים למחצה על מנת לחקור את יחסי הגומלין הפיזיקאליים בין ההתקן לנקודות הקוונטיות. להרחבה תיאורטית נוספת ניתן לעיין בעבודות וספרים המפרטים לעומק את תכונות המוליך למחצה.¹³⁻²⁰

כאשר מאפיינים רמות אנרגיה במוליכים למחצה נהוג להתייחס לאזור ברילואין (Brillouin zone) הראשון במרחב התנע (k). מגדירים את פער האנרגיה (Energy gap (E_g)) במוליך למחצה כהפרש בין נקודת המינימום בפס ההולכה לבין נקודת המקסימום בפס הערכיות. כאשר שתי הנקודות מתקבלות עבור אותו k מגדירים את הפער כפער ישיר (direct gap), אחרת הפער מוגדר כפער עקיף (indirect gap) (איור 1.1).²¹ הגדרת סוג פער האנרגיה חשובה במקרה של מעבר אלקטרון מפס הערכיות לפס ההולכה ולהפך. על מנת שיתקיים מעבר כזה תוך כדי פליטת פוטון חייבים להישמר חוקי שימור אנרגיה ותנע. במקרה של פער ישיר ישנו שינוי רק באנרגיה לעומת פער עקיף שיש עבורו גם שינוי בתנע.²² כאשר מעררים אלקטרון מפס הערכיות לפס ההולכה (Generation) על ידי הוספת אנרגיה למערכת (הארה, חימום ועוד) יוצרים "חור" בפס הערכיות, חור זה מאופיין ע"י מטען חיובי ומסה אפקטיבית משלו. זוג כזה של אלקטרון וחור כאשר המשיכה ביניהם היא קולומבית, נקרא אקסיטון (Exciton). בהמשך העבודה נדון בהרחבה על אנרגיית ורדיוס האקסיטון. שיחבור (Recombination) הוא תהליך הפוך בו האלקטרון חוזר לפס הערכיות, במקרה של חומר בעל פער ישיר, הירידה תלויה בפליטת פוטון בעל אורך גל המתאים לפער האנרגיה. תכונה זו מהותית ליצירת LED או לייזר מבוסס מוליך למחצה בעל פער ישיר.^{23, 24}



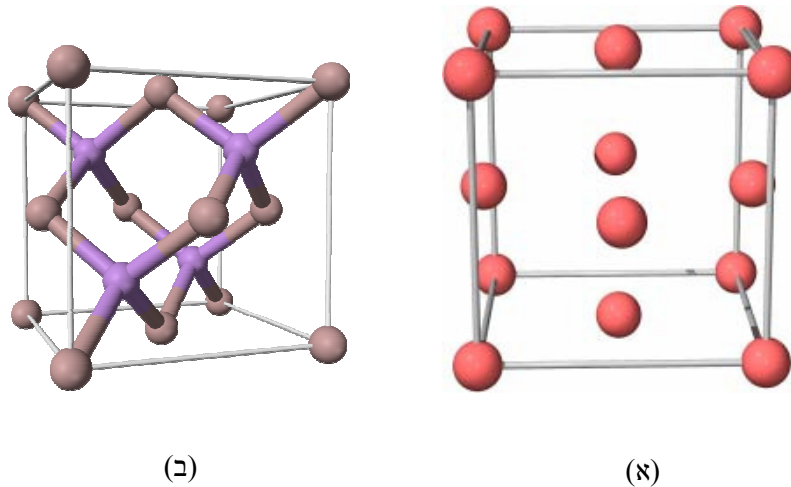
איור 1.1. מבנה הפסים ומעבר אלקטרון מפס ההולכה לפס הערכיות של חומר בעל (א) פער עקיף (ב) ופער ישיר. בפער עקיף נדרש פוטון ופונון ובפער ישיר רק פוטון.

1.2.2 גליום ארסניד (GaAs)

גליום ארסניד הוא מוליך למחצה מסוג $III - V$. גליום ארסניד הורכב לראשונה על ידי Goldshmidt בשנת 1920²⁵ ולראשונה פורסם בעל תכונות של מוליך למחצה ב 1952.²⁶ גליום ארסניד הוא בעל שתי תכונות עיקריות המקנות לו יתרון על גבי סילקון כאשר דנים בהתקנים חשמליים. התכונה הראשונה מתבטאת בניידות הגבוהה של האלקטרונים בו²⁷ כך שתחת השפעת שדה האלקטרונים ינועו במהירות גבוהה יותר מאשר בסילקון. מכאן שניתן לעבוד איתו בתדירויות גבוהות יותר.²⁷ היתרון הנוסף של הגליום ארסניד הוא היכולת ליצור מגליום ארסניד מצע של מוליך למחצה מבודד חלקית (*semi-insulating*), דבר המגדיל את הקיבול ומאפשר גם כאן ליצור התקנים עבור תדירויות גבוהות (1GHz) העשויים מקשה אחת.²¹

גביש גליום ארסניד מורכב משתי תתי שכבות שכל אחת מהם מסודרת בצורת fcc בפני עצמה (איור 1.2 (א)). שתי שכבות אלו משולבות אחת בשנייה בסטייה של חצי דיאגונל של ה fcc. קונפיגורציה כזו נקראת *zincblende*. ניתן לראות את תא היחידה של גליום ארסניד באיור 1.2 ב בו לכל אטום גליום ישנם ארבעה שכנים מסוג ארסניד ולהפך.²² מגדירים את אורך קוביית היחידה a אזי המרחק בין שכנים הוא $r_0 = \frac{3a}{4}$, בטמפרטורת החדר $a = 5.65325 \pm 0.00002 \text{ \AA}$

וצפיפות החומר היא $d = 5.3174 \pm 0.0026 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.²¹



איור 1.2. (א) מבנה תא יחידה *fcc* (ב) מבנה תא היחידה של גליום ארסניד מסוג Zinc-blende. תא יחידה כזה כולל ארבעה אטומים של גליום וארבעה של אטומים ארסניד.

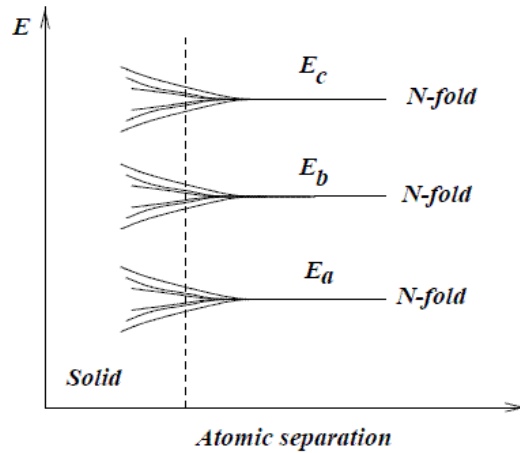
על מנת להבין את תופעת ההולכה של אלקטרונים וחורים בגליום ארסניד יש צורך להבין את מבנה פסי האנרגיה בחומר. כפי שידוע ממכאניקת הקוונטים אלקטרונים באטומים מבודדים מתקיימים ברמות בדידות (דיסקרטיות) מסוימות. כאשר מקרבים אטומים עד לקבלת מוצק על פי אותם חוקים פיזיקאליים מקבלים רצף של פסי אנרגיה (איור 1.3), כאשר פסים אלו הם פסי הערכיות וההולכה המופרדים ע"י פער אנרגיה. פסים אלו הם בעלי תלות בטמפרטורה, ומכאן שגם גודל אנרגיית הפער GaAs תלויה בטמפרטורה על ידי היחס הבא:

$$E(T) = 1.519 - 5.405 \times 10^{-4} T^2 / (T + 204) \text{ eV} \quad (1.1)$$

כאשר עבור טמפרטורת החדר נקבל:

$$^{28} E(300) = 1.42 \text{ eV}$$

בטמפרטורת $T = 0K$ כל האלקטרונים שוהים בפס הערכיות כאשר כל המצבים בפס מלאים וכך בעצם לא מתאפשרת תנועת נושאי מטען והמוליך למחצה מתנהג כמבודד. מעל טמפרטורה זו חלק מהאלקטרונים מבצעים מעבר אנרגטי לפס ההולכה ובכך נוצרת אפשרות לזרם בחומר, בהעדרו של האלקטרון בפס הערכיות נוצר "חלל" בפס הערכיות הנקרא חור. חור זה בעל תכונות של מסה, ניידות ועוד, המאפשרות ליצור זרם של חורים. בגליום ארסניד ניידות החור קטנה בסדר גודל מאשר ניידות האלקטרון ולכן בדרך כלל מתייחסים רק לזרם האלקטרונים.²⁷ כפי שהוזכר קודם כאשר חור משתחבר עם אלקטרון נקבל פליטה של פוטון, כאשר אורך גל הפוטון מושפע מתכונות החומר. כאשר מודדים פליטה מגליום ארסניד מוצאים כי מלבד הפליטה של פער האנרגיה ישנן פליטות נוספות מהחומר עצמו הנובעות מכך שהגליום ארסניד הוא לא טהור.²⁹



איור 1.3. התנהגות הרמות האנרגטיות של אטומים כפונקציה של המרחק ביניהם.
(From: Y. Galperin - Introduction to Modern Solid State Physics p.50.)

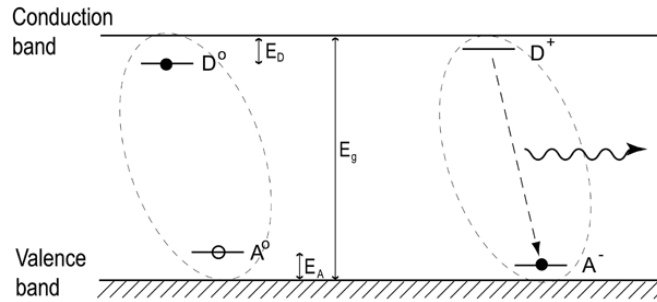
1.2.3 רמות אנרגיה של מאלחים בגליום ארסניד

עד כה עסקנו בגליום ארסניד טהור ז"א ללא פגמים זיהומים או תופעות פני שטח, במילים אחרות כל אטום מוקף סביבו באטומי גליום/ארסניד בלבד. כל שינוי ממצב הומוגני זה בעקבות פגמים, מצבי פני שטח וסימום, גורר שינוי במבנה הפסים. כאשר נסתכל על השינויים בעקבות סימום ניתן להגיד שבאופן כללי נוספים פסי אנרגיה למבנה הפסים הקיים של מוליך למחצה (איור 1.4). מיקום רמות נוספות אלו נקבעות על ידי סוג הסימום, כאשר מסממים את החומר באטום עשיר באלקטרונים או נקבל רמת תורם (donor) והיא תמוקם מתחת לפס ההולכה, במצב זה האלקטרונים ברמה מספיק גבוהה כך שהם צריכים מעט אנרגיה תרמית בשביל לעבור לפס ההולכה. באופן דומה כאשר מסממים עם אטום העשיר בחורים או מקבלים את רמת הנוטל (acceptor) קרוב לפס הערכיות וההולכה שתתקבל היא של חורים.

כאשר מסממים מצע של גליום ארסניד באטומי סילקון הם יכולים להתחלף עם אטומי הגליום Si_{Ga} או עם הארסניד Si_{As} ³⁰. כאשר החילוף הוא של הגליום, הסילקון תורם אלקטרון ואילו החילוף של הארסניד תורם חור למצע.³¹ מכיוון שמבנה הפסים נובע מפתרון של משוואת שרדניגר והיא מושפעת מתנאים חיצוניים כסימום, טמפרטורה, לחץ ועוד. נקבל תלות של הרמות הנוצרות בפרמטרים אלו, עם זאת רמת ההשפעה הוכחה כנמוכה עבור סימום מסדר גודל של $10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, לכן ניתן להסתכל על רמות אלו במחקרנו כקבועות.³² הנחה זו נכונה עד כדי ריכוז סימום מסוים, כאשר ריכוז הסמם מאוד גבוה נקבל שהמרחק בין אטומי סמם שכנים יורד עד שבשלב מסוים מסלול תנועת אלקטרוני ערכיות יחפוף לתנועת המסלול של שכנו. מוליך למחצה זה נקרא מנוון (degenerate). במקרה זה משתנות תכונותיו האופייניות של המוליך למחצה ולא ניתן להניח שרמות המאלחים קבועות. ניתן לבטא את הבדלי האנרגיה בין רמת התורם ורמת הנוטל ע"י³³

$$E_{DA} = E_g - (E_D + E_A) + \frac{e^2}{\epsilon r_{DA}} \quad (1.2)$$

כאשר e הוא מטען אלקטרון, r_{DA} המרחק בין תורם לנוטל ו ϵ הקבוע הדיאלקטרי ($\epsilon = 13$) במקרה של גליום ארסניד), אנרגיה זו תתאים כמובן לפוטון הנפלט משחבור בין רמות אלו איור (1.4). עבור גליום ארסניד המסומם ע"י אטומי סילקון רמות אלו נמדדו ונמצאו כ $E_C - E_D = 5.87 meV$ ו $E_A - E_V = 34.8 meV$ ³⁵. פרמטרים אלו חשובים כאשר מודדים פליטה ממצע גליום ארסניד בדומה למה שנעשה בעבודה זאת. בנוסף למדידות אופטיות על גבי גליום ארסניד בעבודה זו נשתמש בהתקנים המבוססים על חומר זה לשם מדידות חשמליות.



איור 1.4. רמות אנרגיה שנוצרות בעקבות סימום של המצע, רמת נוטל E_A ורמת תורם E_D ופליטת פוטון משחבור בין שתי הרמות (From: <http://large.stanford.edu/courses/2007/ap272/rowell1/>)

1.3 התקני GaAs/AlGaAs בעל מוליכות גבוהה

1.3.1 התקנים המבוססים על מבני תרכובות

צומת של אותו מוליך למחצה אשר מסומם בצורה שונה משני צידי הצומת נקרא homojunction, דוגמא אופיינית לצמת כזה הוא צמת pn המורכב ממוליך למחצה כלשהוא. לעומת זאת heterojunction זהו צמת בין שני מוליכים למחצה שונים בעלי מרכיבים שונים למשל $GaAs / AlGaAs$. חומרים אלו הם בעלי פערי אנרגיה שונים מכיוון שישנם אטומים חדשים בסריג המשפיעים על מבנה הפסים, כך שגודל פער האנרגיה הוא פונקציה של כמות האלומיניום שהוכנסה לגליום ארסניד. במבנים אלו משתמשים בעיקר לשני התקנים: Heterojunction bipolar transistor (HBT) ו High electron mobility transistor (HEMT) אני ארחיב על סוג ההתקן הראשון (ההתקן השני פועל לפי עקרון דומה).

1.3.2 טרנזיסטור בעל מוליכות גבוהה (HEMT)

הניידות של האלקטרונים בגליום ארסניד מוגבלת בגלל פיזור האלקטרונים מנוכחות אטומי הסימון בחומר. אם יוצרים מבנה בו נקטין את השפעת הפיזור של אטומי הסימון נוכל ליצור התקן בעל ניידות גבוהה. בהתקן בעל ניידות גבוהה בתצורתו הפשוטה אנו מצמידים $GaAs$ ללא סימון ל- $AlGaAs$ מסומם ובעקבות ההבדלים בפערי האנרגיה מתקבל בור פוטנציאל בחיבור בין שני החומרים איור (1.5 (a)). בור זה נוצר באזור ה- $GaAs$ כך שאין בו אטומים מאלחים והפיזור לכן קטן יותר ואי לכך הניידות גדלה. בגלל שה- $AlGaAs$ מסומם האלקטרונים זורמים ממנו לעבר הבור, מצד שני הפוטנציאל החשמלי של האלקטרונים מאלץ אותם להישאר באזור האטומים התורמים כך נוצר ריכוז גבוה של אלקטרונים בחיבור בין שני החומרים. ריכוז אלקטרונים זה נקרא $2D\text{ electron gas } (2DEG)$ שזהו בעצם "ים" אלקטרונים היכול לנוע בשני מימדים וכלוא במימד השלישי והוא בעל הניידות הגבוהה.^{10, 11} דרך הסתכלות נוספת להבין את היווצרות הריכוז הגבוה של האלקטרונים בבור הפוטנציאלי היא בהבנת התהליך של השוואת הפוטנציאל על ידי רמת פרמי. במצב של שווי משקל רמת פרמי קבועה לאורך כל החומר כך שנוצר מצב בו רמת פרמי גבוהה יותר מנקודת המינימום בבור הפוטנציאל ואז לפי הגדרת רמת פרמי מקבלים שהבור מלא באלקטרונים (איור (1.5 (a)).

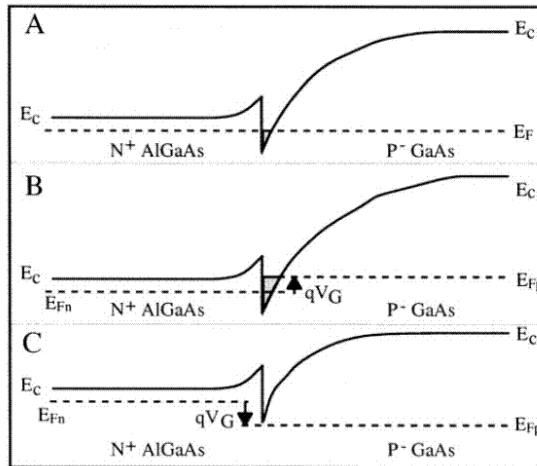
ה- $HEMT$ פועל על פי אותו עקרון פיזיקאלי כמו ה- $MOSFET$ (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor). ההבדל העיקרי ביניהם הוא שב- $HEMT$ תעלת ההולכה היא בעצם ה- $2DEG$ ואילו ב- $MOSFET$ היא נושאי מטען במצע. לכן כאשר מופעל מתח חיצוני קטן יחסית על השער, משתנה ההולכה של ה- $2DEG$ בעקבות כיפוף הפסים (איור 1.5 (b,c)). מכיוון שהניידות ב- $2DEG$ גבוהה מאשר ב- $MOSFET$ וצפיפות הזרם היא ביחס ישיר לניידות נקבל ששינוי האות גבוה יותר ב- $HEMT$. למשל עבור מקרה שבו צפיפות נושאי המטען ב- $2DEG$ היא מסדר גודל של 10^{12} אלקטרונים לס"מ מרובע הכלואים בשכבה בעובי $100\text{\AA}$ נקבל ניידות של: $10^6 \frac{cm^2}{s \cdot V}$ (מייצג שנייה ו V מתח) בטמפרטורה נמוכה, לעומת זאת עבור

סימון של 10^{17} לס"מ מעוקב ב- $MOSFET$ נקבל שהניידות יכולה להגיע ל- $10^4 \frac{cm^2}{s \cdot V}$. תכונה זו

של הטרנזיסטור מנוצלת במדידות הדורשות רגישות גבוהה כמו בעבודה זו.

ישנן דרכים רבות ליצירת $HEMT$ בעזרת גידול חומרים שונים בהתאם לפרמטרים הנדרשים מההתקן. במחקר זה נעשה שימוש ב- $HEMT$ בו גידול השכבות נעשה על גבי $GaAs$ בעובי מיקרונים בודדים על מנת לבדוד את השפעות המצע. על גבי גודלה שכבה ראשונה של $In_{18}Ga_{82}As$ ועל גביה $Al_{38}Ga_{62}As$, בין שני חומרים אלו נוצרת כאמור שכבת ה- $2DEG$. בשביל ליצור מאגר של אלקטרונים שיסממו את בור הפוטנציאלי שנוצר מגדלים שכבה של $n\text{-type } GaAs$. את שכבה זו מרחיקים מעט מבור הפוטנציאל על מנת להגדיל את הניידות בעזרת שכבה דקה ולא מסוממת של $GaAs$. למניעת חמצון של המבנה וכן למנוע מעבר

אלקטרוניס מתוך ה- $n\text{-type GaAs}$ לכיוונים אחרים בחומר מגדלים שכבות נוספות חוזרות על עצמן של AlGaAs / GaAs . השימוש שנעשה בעבודה זו עם ה- HEMT הוא ביצירת טרנזיסטור בו השער (gate) הוא שער אופטי המורכב מננו חלקיקים המוצמדים להתקן בעזרת שכבה אורגנית כפי שיוסבר בהמשך.



איור 1.5 – מבנה הפסים של 2DEG של AlGaAs / GaAs : (A) ללא מתח חיצוני (B) תחת מתח אחורי (C) תחת מתח קדמי (From: A.coling –Physics of semiconductor devices p.323).

1.4 מולקולות אורגניות

1.4.1 התארגנות עצמית של מולקולות (Self-assembled monolayer (SAM))

אחד הכלים השימושיים בהתקנים ננומטרים הם המולקולות האורגניות, מולקולות אלו המבוססות על שלד פחמני יכולות לתת מענה לצרכים שונים של התקנים בזכות הגמישות בתכונות החשמליות, המגנטיות והאופטיות שלהן שניתנות לבחירה. בנוסף מולקולות אלו נוחות לשימוש בזכות היציבות שלהן בטמפרטורת החדר ויכולת ההתארגנות העצמית שלהן מתוך תמיסה. אחת מצורות הספיחה של מולקולות אורגניות על גבי מצע היא בטבילה של המצע בתמיסה האורגנית, המולקולות במקרה שלנו נקשרות בקשר קוולנטי למצע כך שנוצרת שכבה אחידה של מולקולות אורגניות אותן ניתן לקשור הלאה לננו חלקיקים. בשיטה זו שפותחה על ידי *Sagiv* בשנות השמונים ניתן לספוח סוגי מולקולות שונות, על גבי סוגי מצעים שונים וכן יותר משכבה אחת.³⁶

התארגנות עצמית של מולקולות מתאפשרת בעקבות קשר כימי בין המצע לבין האטום/אטומים בקצה המולקולה האורגנית (קבוצת הראש), וכן בזכות קשרים כגון הידרופוביים המתקיימים בין השלדים הפחמניים של המולקולות השונות. תכונות אלו מאפשרות להבחין בשינויים קטנים הקורים בין המולקולה למצע וכן בשכבה האורגנית עצמה ע"י צימוד להתקן

מתאים. שינויים אלו יכולים לנבוע סיבות שונות למשל מנהור של אלקטרונים לפני המצע או שינוי במיקום/צפיפות האלקטרונים על פני השטח. כמובן השינוי לא דומה עבור סוגי מולקולות שונות ועבור מצעים שונים, ההבדל בין המקרים נובע מסוג הקשר הכימי אל המצע, אופי קבוצת הראש האורגנית, סוג המולקולה, אורכה, סוג הקשרים מהם השלד הפחממני שלה מורכב, הקונפיגורציה של המולקולה סוג המצע ועוד. לכן כאשר סופחים מולקולות על גבי מצע יש לברור את סוג קבוצת הראש לסוג המצע המתאים ליצירת הקשר בניהם, לדוגמא מצע בעל שיכבה חמצנית כסילקון יצור בקשר קוונטי עם קבוצת ראש מסוג סילאן וכן מצע של גליום ארסניד שגם הוא בעל שיכבה חמצנית. אולם אם נסיר את שכבת התחמוצת מהגליום ארסניד או נבחר מצע זהב (שאינו בעל שיכבת חמצון) ניתן לקשור אותם בקשר קוולנטי לקבוצת ראש טיולית. השרשרת הפחממנית ניתנת גם היא לשינוי על פי התכונות הרצויות. מולקולה המורכבת מקשרים בודדים (קשרי סיגמה) תשמש כמבודדת חזקה יותר ממולקולה המכילה קשרים כפולים (קשרי פאי) שהם בעלי אלקטרונים לא מאותרים ועל כן המוליכות שלהם טובה יותר כדוגמת בנזן. באמצעות ספיחות אלו ניתן לבחון תכונות פני שטח, כיווני דיפול, הידרופוביות או הידרופיליות.^{37,38}

בעבודה זו שעוסקת במעבר מטענים בין ננו חלקיקים למצעים המולקולות שימשו כמגשרות ומצמדות בניהם, כך ששינוי סוג המולקולה אפשר הבנת ההשפעה של השכבה האורגנית על מעבר המטענים. בנוסף היכולת של המולקולה האורגנית לגשר בין הננו חלקיקים למצע סיפק לנו את היכולת לבנות התקנים בעלי מספר שכבות של ננו חלקיקים.

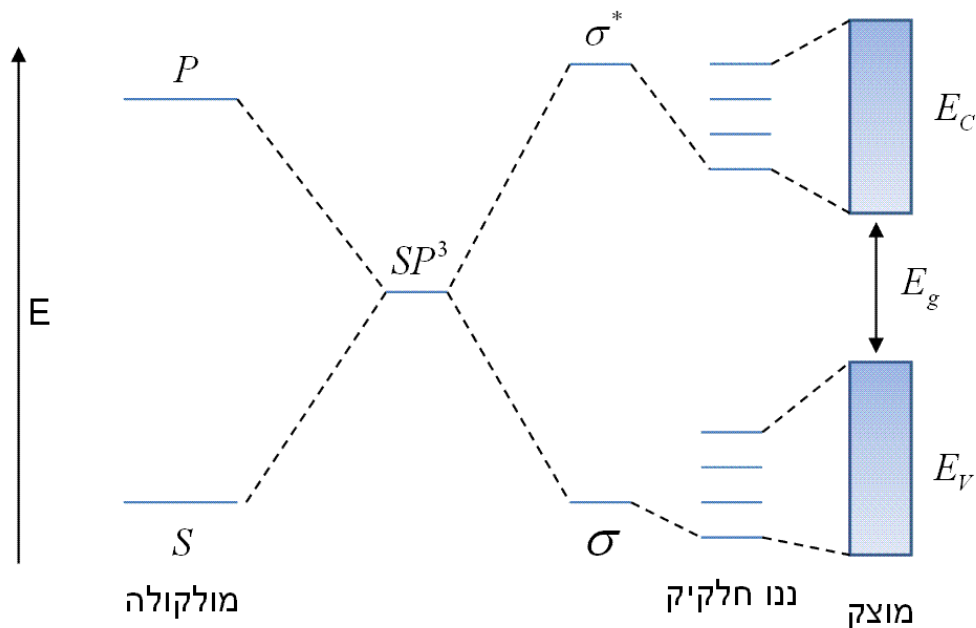
1.4.2 סוגים שונים של מולקולות אורגניות

מטרת עבודה זו היא לחקור את מעבר המטען מננו חלקיקים מסוג מוליך למחצה למצע. בשביל לקבל הבנה נרחבת של מעבר זה היה צורך לנסות לבחון את המעבר תחת תנאים שונים. כפי שהוזכר סוג המולקולה הנוחה לשימוש תלויה בסוג המצע והננו חלקיק שאנו צריכים לצמד. בעבודות קודמות כבר הוכח שעל גבי גליום ארסניד, כאשר הוא ללא שכבה חמצנית, ניתן לספוח מולקולת דיטיואלפטית כך שמולקולת הראש נקשרת ישירות אל הארסניד.³⁹ לעומת זאת לספיחה על גבי סילקה (סילקון מחומצן) נשתמש בקשר הידוע בין חמצן לסילאן.⁴⁰ גורם נוסף אותו חקרנו הוא הקישור של הננו חלקיקים למצע גליום ארסניד דרך מולקולת דיטיואל המכילה בנזן.⁴¹ אמנם מולקולת הדיטיואלפטית היא מולקולה אורגנית המורכבת משרשרת של פחמנים בדומה למולקולת הבנזן אך ההבדל הרלוונטי למעבר מטען הוא שלמולקולה המכילה בנזן ישנם אלקטרונים "אל איתור" הנובע מקשרי π . בעקבות הבדל זה נוצרים הבדלים בהעברת המטען בין שני המקרים.⁴¹

1.5 ננו חלקיקים

1.5.1 תכונות כלליות של ננו חלקיקים

ננו גבישים הינם חלקיקים בגודל של רדיוס מעשרות עד מאות אנגסטרומס (A^0) מסדר גודל של רדיוס בוהר של האקסיטון. הננו חלקיקים מורכבים ממאות עד אלפי אטומים המסודרים בליבה בעלת מבנה מחזורי. ננו גבישים מהווים מודל לחקר התפתחות התכונות בין הגבול המולקולארי למצב המוצק. כאשר מקרבים זוג אטומים זה לזה נוצר בניהם קשר כימי ומתקבלות רמות אנרגיה מולקולאריות שונות מהרמות האטומיות. צירוף מספר רב של אטומים מוביל למספר רב של רמות אנרגיה בדידות שצפיפותן תלויה במספר האטומים. בגבול של גביש מקרוסקופי (*Bulk*) צפיפות הרמות גדולה מספיק בשביל לייצור רצף רמות, כך שמתקבל פס אנרגיה (איור 1.6). פסי אנרגיה אלו הם פס הערכיות וההולכה במוליך למחצה. כאשר מימדי הננו חלקיק גדלים נוספות עוד רמות אנרגיה ופער האנרגיה קטן כך שמשתנה ספקטרום הבליעה של החומר, כך שמתקיים היחס שעבור ננו חלקיקים ככל שהם גדלים אורך הגל הנבלע על ידיהם גדל (משוואה 1.7). תופעה זו מכונה תיחום קוונטי (quantum confinement).



איור 1.6. סכימה המתארת את רמות האנרגיה של אטומים אשר מוצמדים בהדרגה עד לקבלת מוצק במוליך למחצה.

ניתן להכין ננו גבישים מחומרים שונים, כגון מתכות, מבודדים, ומוליכים למחצה. ננו חלקיקים של מוליכים למחצה ייחודיים בכך שרבות מתכונותיהם האופטו-אלקטרוניים תלויים בגודל הגביש בתחום רחב של גדלים. לדוגמא ספקטרום הבליעה של קדיום סלניד $CdSe$ משתנה מ $1.7eV$ בתחום האינפרא אדום ועד $2.5eV$ בתחום הנראה עם שינוי קוטר הננו חלקיק מ $100A^0$ ל $20A^0$ בהתאמה. דוגמא נוספת של תלות תכונות הגביש בגודלו ניתן לראות במוליך למחצה מסוג קדמיום סולפיד CdS ⁴. כאשר מקטינים את מימדי הננו חלקיק מ $60A^0$ ל $20A^0$ משתנה צבע הגביש ואנרגיית הפער עולה מ $2.5eV$ עד ל $4eV$. פרמטרים נוספים המשתנים הם אנרגיית הטעינה של אלקטרון נוסף לננו חלקיק וכן התכונות התרמו דינמיות, טמפרטורת התכה והלחץ הדרוש למעבר פאזות. תופעות אלו נובעות בחלקן מתכונה נוספת של הננו חלקיק – ככל שהננו חלקיק קטן יותר היחס בין מספר האטומים על פני השטח ומספר האטומים בפנים נעשה גדול יותר. כך שהאנרגיה החופשית של פני השטח הופכת לאחד הגורמים העיקריים בקביעת התכונות התרמו דינמיות. שינויים אלו בתכונות החומר מתרחשים רק כתוצאה משינויים בגודל הגביש, כאשר ההרכב הכימי אינו משתנה. לפיכך ננו גבישים מהווים מערכת קוונטית נשלטת המראה תופעות קוונטיות גם בטמפרטורת החדר.

מלבד המחקר של הננו חלקיק כמערכת מודל למחקר קוונטי לתכונות הננו חלקיקים מתווסף עניין טכנולוגי. עם התקדמות המזעור בכל תחומי הטכנולוגיה ובפרט בעולם המיקרואלקטרוניקה, יש מוטיבציה לחקר תכונות החומר בהקטנת מימדיו. מגמת המזעור השולטת בתעשיית המיקרואלקטרוניקה מתקרבת לתחום שבו הטכנולוגיה הנוכחית עשויה להגיע למגבלתה הבסיסית. ברור שמזעור נוסף ישנה את אופי ההתקנים הקיימים כיום ויצריך חשיבה קוונטית, מעבר לזאת התהליכים בגדלים הננו מטריים בעיתיים. בעיה זו מובילה לחיפוש אלטרנטיבות שיבטאו שינוי תפיסתי באופן פעולת והרכבת הטרנזיסטור. היכולת לבנות התקנים מננו גבישים תלויה במידה רבה ביכולת להכין מערכים מאורגנים של ננו חלקיקים שתכונותיהם המבודדות וקולקטיביות ניתנות לשליטה⁴. היתרונות והתכונות של הננו חלקיקים מאפשרות להשתמש בננו חלקיקים בהתקנים יישומיים שפורטו בסעיף 1.1.

עבודה זו עוסקת באפיון אופטי וחשמלי של מעברי אנרגיה/נושאי מטען מננו חלקיקים מסוג $CdSe$, $InAs$ ו PbS למצעי סיליקון וגליום ארסניד. נדון בהשפעת פרמטרים שונים על יכולת מעבר המטענים ונציג מודל תיאורטי המבוסס על עבודות קודמות, המתאים לתוצאות שהתקבלו, בשביל להבין את המודל המוצע נציג את הפיתוח של מבנה הרמות בננו חלקיקים.

1.5.2 תיחום קוונטי ופסי האנרגיות בננו גבישים של מוליך למחצה

1.5.2.1 הגדרת אקסיטון⁴²

אקסיטון הינו זוג קשור של אלקטרון וחור, כאשר אינטראקציה קולומבית מהווה את הקישור בניהם. ניתן לראות דמיון בין בעיית אקסיטון לבעיית אטום המימן, דמיון זה מאפשר להשתמש במודל התיאורטי של אטום המימן לתיאור האקסיטון. הפיתוח לאנרגיית ורדיוס האקסיטון בעל שלושה הבדלים מהפיתוח של מודל בוהר לאטום המימן:

1. במודל בוהר האלקטרון באינסוף ביחס לגרעין לעומת זאת באקסיטון המרחק בין האלקטרון בפס ההולכה לחור בפס הערכיות אמנם גדול אך סופי.
 2. כאשר מפתחים את מודל בוהר מניחים שאטום המימן נמצא בואקום. באקסיטון ישנו אפקט מיסוך של שאר נושאי המטען לכן צריך להכניס תיקון התלוי במקדם הדיאלקטרי של החומר.
 3. באטום המימן מזניחים את מסת הגרעין בשל יחס של $1/1200$, אך באקסיטון המסות האפקטיביות הם מאותו סדר גודל לכן החישוב נעשה על ידי מסה מצומצמת של חור ואלקטרון.
- לאחר הנחות אלו וכן חישוב ב $k = 0$ עבור מצבים אופטיים, נקבל:

$$E_{exciton} = \frac{13.6eV}{\epsilon_r^2} \frac{\mu^*}{m_e} [eV] \quad (1.3)$$

ואת רדיוס בוהר:

$$a_{exciton} = \frac{0.53\epsilon_r}{\frac{m^*}{m_e}} [A^0] \quad (1.4)$$

כאשר ϵ_r הוא מקדם דיאלקטרי של החומר m_e מסת האלקטרון ו m^* מסה מצומצמת של אלקטרון וחור. מרחקים אופייניים ל a_{ex} הם $100A^0$ ו $360A^0$ עבור $CdSe$ ו $InAs$ בהתאמה. הקטנת המימדים של מוליך למחצה לממדים אלו ומטה מובילה להגבלת האקסיטון בתוך הגביש-תיחום קוונטי, הגורמת לקונציטציה של רמות האנרגיה. בין המערכות הנלמדות בהקשר של השפעת התיחום הקוונטי על החומר הם התקנים רב מימדים המבוססים על מוליכים למחצה. טכניקות מודרניות מאפשרות לייצור מערכות שבהם רמות האנרגיה מקוונטות בממד אחד (מערכת דו ממדית), מערכת כזו נקראת quantum well.⁴³ מערכות בהן רמות האנרגיה מקוונטיות בשני ממדים (מערכת חד ממדית) נקראות quantum wire. תיחום קוונטי בכל שלושת המימדים יוצר מערכת "אפס ממדית" הידועה בשם quantum dot. הננו חלקיקים של מוליכים למחצה שבהם אנו משתמשים בעבודה זו הם דוגמא למערכת "אפס ממדית".^{44,4}

1.5.2.2 מודל "חלקיק בקופסא"^{46,45}

מודל "חלקיק בקופסא" הינו מודל המסביר מדוע פער האנרגיה גדל עם הקטנת גודל הגביש. בגבול של "תיחום קוונטי חזק", שזהו הגבול בו רדיוס הננו חלקיק (a) קטן ביחס לרדיוס האקסיטון (a_{exc}). ניתן להתייחס אל האלקטרון והחור כשני חלקיקים בלתי תלויים אשר מצבי האנרגיה שלהם הינם מצבי החלקיק בבור פוטנציאל כדורי אינסופי. האינטראקציה הקולומבית נלקחת בקירוב של תורת ההפרעות מסדר ראשון. המודל מפורט באריכות בנספח א, נציג כעת את עיקריו בשביל הבנת מבנה רמות האנרגיה בננו חלקיק. המודל כרוך בשלושה קירובים:

1. קירוב פונקציית המעטפת: פונקציית הגל ניתנת לכתיבה כמכפלת החלק המחזורי של פונקציית בלוך $u(\vec{r})$ ופונקציית מעטפת כדורית $\psi(\vec{r})$. כך שניתן לרשום את פונקציית הגל כך: $\Psi(\vec{r}) = u(\vec{r})\psi(\vec{r})$

2. קירוב פסים פארבוליים: תחת הנחות מסות אפקטיביות של חור ואלקטרון ניתן לכתוב את ההמילטוניאן לפונקציית המעטפת אשר כולל את אינטראקציות קולומביות בצורה הבאה:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2 \nabla_e^2}{2m_e^*} - \frac{\hbar^2 \nabla_h^2}{2m_h^*} - \frac{e^2}{\epsilon |r_e - r_h|} + V_e(r_e) + V_h(r_h) \quad (1.5)$$

כאשר m_e^*, m_h^* הן מסות אפקטיביות של החור והאלקטרון ו- ϵ הוא קבוע דיאלקטרי. האיבר השלישי במשוואה מייצג אינטראקציה קולומבית ושני האיברים האחרונים בהמילטוניאן הם הפוטנציאלים הרדיאליים לאלקטרון ולחור של בור פוטנציאל כדורי עם מחסום אינסופי:

$$V(r) = \begin{cases} 0 & r < a \\ \infty & r > a \end{cases}$$

כאשר a הוא רדיוס החלקיק.

3. קירוב תיחום קוונטי חזק: בגבול שבו אנרגיית התיחום הקוונטי לאלקטרון ולחור גדולה בהרבה מאנרגיית המשיכה ביניהם, ניתן לפשט את פונקציית המעטפת במכפלה של שני איברים בלתי תלויים, פונקציית הגל של האלקטרון ופונקציית הגל של החור.

$$\psi_{(\vec{r}_e, \vec{r}_h)} = \psi_{e(\vec{r}_e)} \cdot \psi_{h(\vec{r}_e, \vec{r}_h)} = U_e f_e(\vec{r}_e) U_h f_h(\vec{r}_h) \quad (1.6)$$

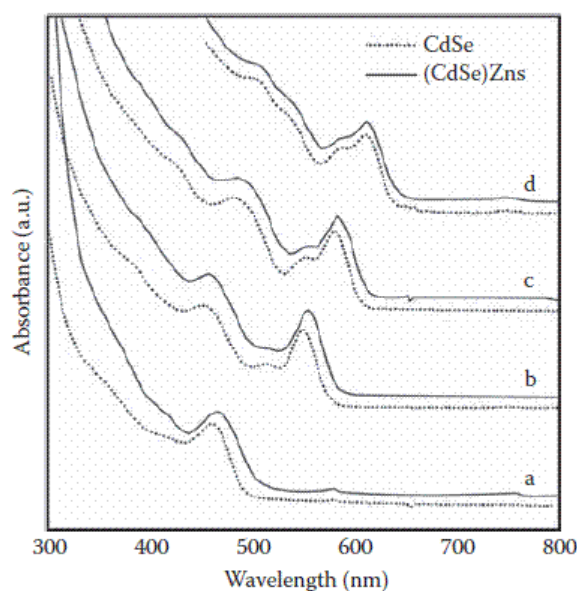
לאחר הנחות אלו אנו מקבלים בעיה של חלקיק בקופסה כדורית, פתרון לבעיה זו נתון על ידי פונקציית בסל בתור החלק הרדיאלי של פונקציית הגל והחלק הזוויתי הוא מסוג "spherical harmonics".

על סמך פתרון זה הרמות האנרגטיות הנמוכות ביותר עבור $n=0, l=0$ נתון על ידי:

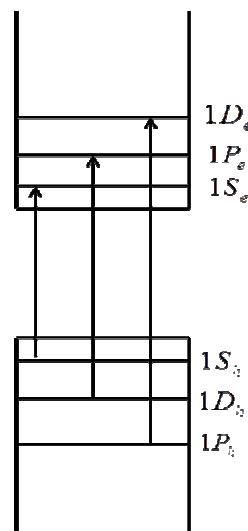
$$E_{(1S_e 1S_h)} = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2a^2} \left\{ \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right\} - \frac{1.8e^2}{\epsilon_e a} \quad (1.7)$$

כאשר האיבר: $E_c = -\frac{1.8e^2}{\epsilon_e a}$ הוא האיבר הקולומבי שהוזנח תחת ההנחות הקודמות

וכעת הוא נוסף בתור תיקון מתוך תורת ההפרעות (פירוט בנספח א). הפתרון המתמטי המחייב אורטוגונליות של פונקציית המעטפת נותן כללי ברירה למעברים מותרים אופטית, $\Delta n = 0, \Delta l = 0$ (איור 1.7 א)



(ב)



(א)

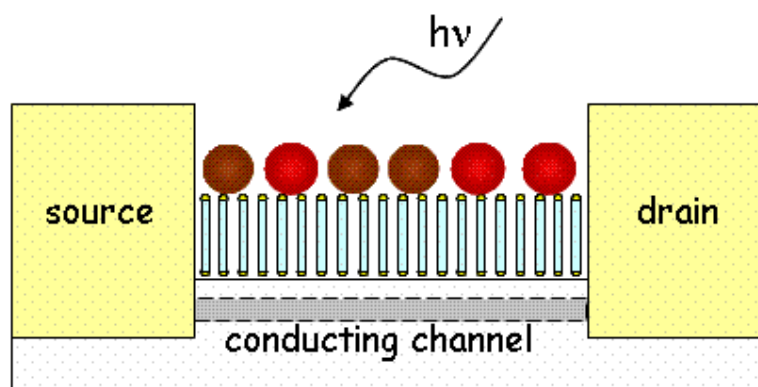
איור 1.7. (א) תיאור כללי הברירה של מעברים אופטיים המותרים מתוך מודל של קופסא כדורית. (ב) גרף בליעה של ננו חלקיקים מסוג $CdSe$ כאשר קוטר הננו חלקיק (nm) הוא: (a) 2.3 (b) 4.2 (c) 4.8 (d) 5.5. ניתן לראות שככל שגודל החלקיק גדל האנרגיה הנבלעת קטנה

מודל זה מפשט את הפתרון עבור אנרגיית הננו חלקיק וקושר בין גודל הננו חלקיק לבין הבליעה האנרגטית שלו (איור 1.7 (ב)). כמובן שמודל מדויק יותר צריך להתחשב במחסום הפוטנציאל בפני השטח וחפיפה בין רמות האנרגיה דבר המשנה את כללי ברירת המעברים האופטיים המותרים.^{48, 47}

1.6 טרניזסטור HEMT בעל שער מננו חלקיקים

כפי שצינו הננו חלקיקים הם בעלי רמות אנרגיות דיסקרטיות הנשלטות על ידי גודל והרכב הננו חלקיק. כדי לשמר את התכונות הקוונטיות בטמפרטורת החדר הננו חלקיקים צריכים להיות מבודדים. אנו משתמשים בהם כשער אופטי למצע טרניזסטור הקשורים בעזרת מולקולות אורגניות ובכך מאפשרים את השימוש בהם בטמפרטורות גבוהות כטמפרטורת החדר. גלאים המבוססים על ננו חלקיקים הפועלים בטמפרטורת החדר כבר הראו תגובה לאור.⁴⁹ על ידי יצירת אקסיתון בננו חלקיק כתגובה לאור ותחת עוצמת זרם מתאימה ניתן לראות שינוי באות הנמדד ובעצם לקבל תגובה מן הגלאי. אפשרות נוספת ליצירת גלאי בעזרת ננו חלקיקים היא השימוש בננו חלקיקים מסונתזים מתמיסה כשער עבור טרניזסטור מסוג HEMT.¹² בגלאי כזה משתמשים בשכבה אורגנית בעלת יכולת התארגנות עצמית (SAM) המקשרת בין מצע הטרניזסטור לננו חלקיק. כאשר הננו חלקיקים בולעים אור בתדירות המתאימה לאנרגיית הפער שלהם נצפה שינוי בזרם העובר דרך הטרניזסטור.

העיקרון של גלאי אור זה מבוסס על השינוי בפוטנציאל האלקטרוכימי הקורה בעקבות בליעת פוטון (איור 1.8). בליעת הפוטון יוצרת אקסיטון שטוען או יוצר דיפול של מצבי השפה של השכבה העליונה של הטרנזיסטור. שינוי זה גורם לשינוי הפוטנציאל האלקטרוסטטי בין הננו חלקיק לבין המצע ועל ידי כך מושפעת תעלת ההולכה בטרנזיסטור, בכך הננו חלקיק משמש בתור השער האופטי של הטרנזיסטור. במקרה של גלאי זה הטרנזיסטור משמש מגבר לכן השינוי בזרם של הטרנזיסטור יכול להיות בכמה סדרי גודל יותר גדול מכמות האלקטרונים המעוררים בננו חלקיק.⁵⁰ בנוסף ניתן לשלוט בצימוד בין הננו חלקיק למצע על ידי שינוי השכבה האורגנית ובכך גם לשלוט בשינוי הסיגנל (ראה סעיף 1.3.2).⁴¹



איור 1.8. ציור סכמטי של גלאי המבוסס על ננו חלקיקים מסוגנתזים המשמשים כשער אופטי.

(Naaman, A. Aharoni, U. Banin and Y. Paltiel, *Appl. T. Aqua, R Phys Lett* **92** (22) (2008).)

2. מערכת ניסיות ושיטות מדידה

2.1.1 מערכות אפיון

Scanning Electron Microscopy (SEM) 2.2.1

בשביל לאפיין דגמים על ידי הדמית פני שטח פותח ב-1935 המיקרוסקופ האלקטרוני הסורק (SEM – Scanning Electron Microscope). ה SEM הוא בעל יכולת הגדלה עד כדי פי 500000 ויכול לזהות ולאפיין חלקים בגדלים ננומטרים.

הדמיית ה SEM נעשית בעזרת קרן אלקטרוניים בעלת אנרגיה גבוהה (30 KeV – 200 eV), מיקוד הקרן והזזתה לשם סריקה נעשית על ידי שימוש בעדשות מגנטיות. קרן אלקטרוניים פוגעת בפני השטח ומתקבלת אינטראקציה בינה לבין הדגם, אינטראקציה זו מורכבת ומאופיינית על ידי כמה תהליכים שמספקים נתונים על החומר כגון המבנה הכימי, המורפולוגי, פליטה אופטית. תהליכים הנותנים את המבנה המורפולוגי כוללים אותות שנוצרו מאלקטרוניים המוחזרים מפני השטח (BSE- backscattered electrons),⁵¹ אלקטרוניים משניים הנפלטים מפני השטח (Secondary electrons).⁵¹ אפיון ההרכב הכימי של החומר נעשה על ידי קרני X הנפלטים כאשר קרן האלקטרוניים מסירה אלקטרון מהקליפה הפנימית של אטום ואלקטרון באנרגיה גבוהה יותר תופס את מקומו ואפיון אופטי על ידי (CL) Cathodoluminescence – נהזקנות קתודית).⁵²

בעבודה זו השימוש ב SEM היה לשם חקירת הספיחה של השכבה האורגנית עם הננו חלקיקים ובנוסף לחקירת התכונות האופטיות של הדגם, עליהן נרחיב בהמשך. המדידות שביצענו התקיימו במכשיר ה-Sirion HR-SEM שבמרכז לננו-מדע וננו-טכנולוגיה ע"ש משפחת הארווי מ' קרוגר באוניברסיטה העברית.

Atomic Force Microscopy (AFM) 2.2.2

מיקרוסקופ כח אטומי (Atomic Force Microscope – AFM) הוא סוג של מיקרוסקופ בוחן סורק (Scanning Probe Microscope – SPM) והוא נועד לחקירת פני שטח. ה AFM הומצא במהלך שנות השמונים ומאז הוא משמש ככלי עקרי למיפוי בעקבות יכולת הרזולוציה הגבוהה שלו המגיעה עד כדי ננו מטרים ספורים. תמונת פני שטח מתקבלת על ידי הבחון הסורק את פני הדגימה ובכך מספק תמונת טופוגרפיה תלת-ממדית.

באופן פשטני ניתן לתאר את ה AFM כמחט חדה מאוד (tip) אשר נעה על פני הדגם בתנועה דו ממדית, תנועה זו מתבצעת מאוד קרוב לפני השטח (10-100nm) כך שהמחט תושפע מ כוחות ון-דר-ואלס, כוחות קפילריים, כוחות אלקטרוסטטיים או אחרים. כוחות אלו משפיעים על המחט ומזיזים אותה בציר הניצב לפני השטח (ציר הגובה), שינוי נמדד על פי רוב על ידי החזרה

של קרן לייזר הפוגעת במחט ומגיעה אל גלאי. שיטה זו מאפשרת יצירת תבנית מתאימה לפני הדגם. בעזרת שינויים ב-AFM ניתן למדוד פרמטרים נוספים כמו מוליכות, טמפרטורה ועוד. בעבודה זו נעשה שימוש ב-AFM לשם איפון דגמים בעלי ספיחה של שכבה אורגנית ונו חלקיקים בעלי שכבה אחת ומספר שכבות, בשביל לקבל מידע על צפיפות הספיחה ואופי השכבות שנוצרו. המדידות נעשו במעבדתו של פרופ' דני פורת בעזרת מכשיר מיקרוסקופ AFM של Nanotec עם בקר Dulcinea.

2.2 מערכות מדידה

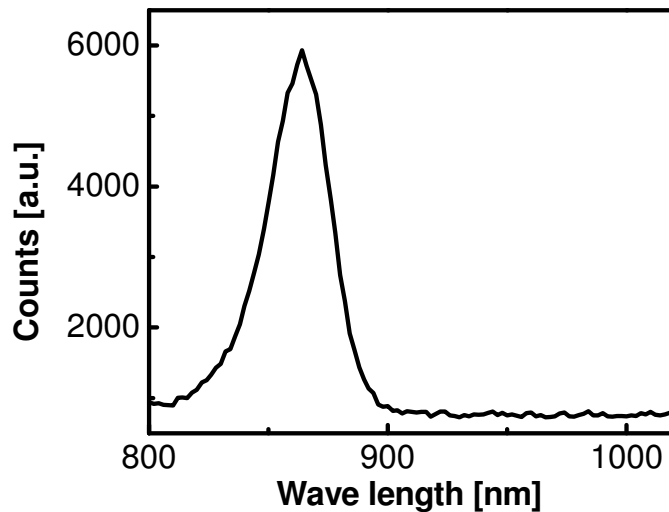
נו החלקיקים הם יכולים במודל פשוט להיחשב בבור פוטנציאל ולכן הם בעלי תכונות אופטיות וחשמליות על מנת לקבל תמונה מלאה על התנהגותם כאשר הם מצומדים לגלאי אפיו התכונות של המערכת באמצעות מדידות בשתי מערכות נפרדות, אופטית וחשמלית.

2.2.1 נְהוֹרָנוֹת קתודית (Cathodoluminescence (CL))

פליטה של פוטונים כתוצאה מעירור באמצעות קרן אלקטרונים נקראת נְהוֹרָנוֹת קתודית (Cathodoluminescence (CL)), תופעה זו דווחה לראשונה באמצע המאה ה-19. למעשה הגילוי של פליטת אור בעקבות הפצצת חומר על ידי קרן אלקטרונים הובילה את THOMPSON ב-1897 לגלות את היחס בין מטען אלקטרון למסתו. תופעות אחרות של פליטה כמו פליטת אור (Photoluminescence (PL)) היו ידועות הרבה לפני, בגלל פשטות המדידות, הן לא דרשו ואקום או מקור אלקטרונים.

CL היא תופעה חשובה טכנולוגית ומשתמשים בה בהתקנים המבוססים על שפופרת קרן קתודית (CRT Cathode ray tube) כמו אוסילוסקופ ועוד. עם הזמן התפתחה טכנולוגיית המיקרוסקופ האלקטרוני וה-CL הפכה להיות כלי מרכזי בניתוח פליטת אור ואפיון המבנה של מבנים מיקרוסקופיים.^{52, 53} הייחודיות של CL לעומת שיטות אפיון דומות (SEM, STEM) נובעת מהעובדה שניתן ללמוד בעזרתה על התכונות האופטיות והחשמליות של חומרים פולטי אור באמצעות ערעור לוקלי ומדויק.

באופן כללי ניתוח דגם בעזרת CL יכול להתחלק לשני חלקים: מיקרוסקופי וספקטרוסקופי. המיקרוסקופי נותן תיאור של פני המצע על ידי תמונה ומיפוי של האזורים הפולטים, והספקטרוסקופי מאופיין על פי ספקטרום אורכי הגל הנפלטים ממנו (איור 2.1).



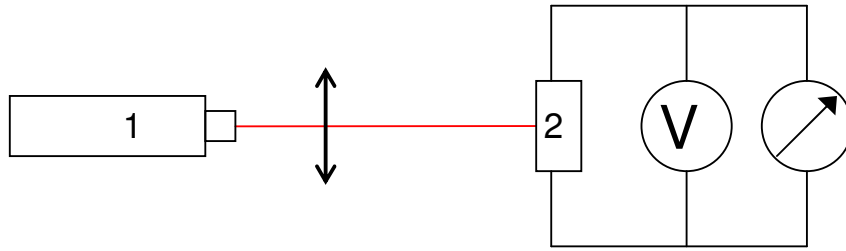
איור 2.1. ספקטרום פליטה של גליום ארסניד שנמדד באמצעות CL.

המכניזם הגורם לפליטת אור מהדגם כאשר מעוררים אותו באמצעות קרן אלקטרוניים דומה למכניזם של מדידות פליטת אור אחרות, לכן תוצאות המדידות יהיו בעיקרן דומות אך ישנה אפשרות להבדלים מסוימים. הבדלים אלו נובעים מהשוני ביצירה של זוג אלקטרון חור במדידות כגון קצב היצירה וגודל המקום בו נוצרים הזוגות. שוני נוסף נובע בעיקר מכך שהעירור על ידי קרן אלקטרוניים גורם לפליטה של מספר רמות אנרגיה רבים בהתאם למוליך למחצה בגלל עוצמת הקרן, לעומת זאת ה-PL תלויה באורך גל של הפוטון הנבלע ובכך מאפשרת לברור מידע נקודתי. בנוסף בגלל עוצמת קרן האלקטרוניים עומק החדירה של הקרן גדול יותר כך שניתן לאסוף נתונים מרבדים עמוקים יותר. מצד שני עוצמה גבוהה מרחיבה את אזור האיסוף בגלל הפיזור של אלקטרוניים אנרגטיים נוספים.

בניסוי שלנו השתמשנו בשיטת ה-CL של ה-SEM מסוג SIRON כאשר סדרי הגודל של עוצמת הקרן היו $20KV - 30KV$. הפוטונים הנפלטים מן הדגם נאספו ע"י *NIR Photomultiplier tube*. כל מדידות ה-CL בוצעו בטמפרטורת החדר.

2.2.2 מערכת מדידה חשמלית

המדידות החשמליות נעשו במערכת מדידה I-V (איור 2.1). כאשר הפרמטר שמשתנה הוא הזרם בעזרת ספק זרם (Keithley 6221 DC and AC current source) והמדידה היא של המתח (Keithley 2182A nano-voltmete). מערכת ה-I-V חוברה לתא דגם כאשר הוא באווירת חנקן למניעת חמצון של הדוגמא לאורך הניסוי. במהלך הניסוי בדקנו את הגלאי שהתקבל תחת פרמטרים שונים של הארה, מערכת המדידה השתנתה בהתאם לצורך והוספו אביזרים שונים כגון: עדשות, מנחיתי עוצמה ועוד (המערכת הנראית באיור 2.2). היא ללא אמצעים אופטיים אלו. כמו מדידות ה-CL גם המדידות החשמליות כולן בוצעו בטמפרטורת החדר.



איור 2.2. מערכת המדידה החשמלית: 1. לייזר. 2. תא הדגם. תא הדגם מחובר במקביל לספק זרם ומד מתח.

2.3 הכנת ואפיון הדגמים

2.3.1 תהליך הכנת הטרנזיסטור

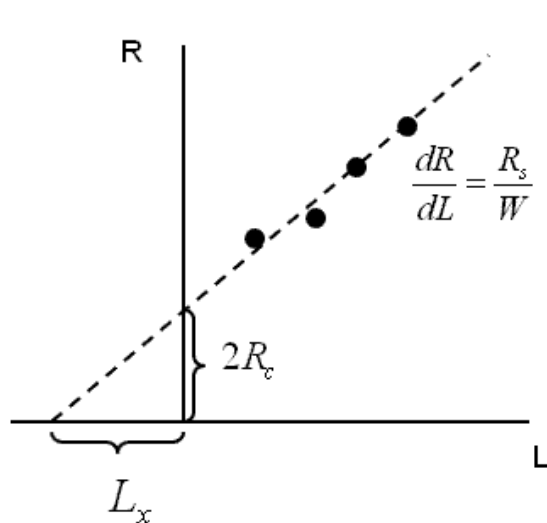
הכנת הטרנזיסטור נעשתה באמצעות כתיבה באמצעות אור (פוטוליטוגרפיה Photolithography (PL) (ההליך עצמו מובא בפירוט בנספח ב). איור 2.2 א) מתאר את המסכה בה השתמשנו ליצירת הגלאי, ניתן לראות שהיא מכילה גלאים בגדלים שונים. חשוב לציין כי כאשר משווים בין מדידות של גלאים שונים צריך לוודא שכל הגלאים הם בעלי אותם התכונות הפיזיקליות כגון: גודל, התנגדות ועוד.

לשם חישוב התנגדות הדגם והמגעים שהתקבלו וההשוואה להתנגדות 2DEG בטרנזיסטור, השתמשנו בנוסחת כיול (תחת ההנחות שהתנגדות הפיסה קבועה והתנגדות המגעים בין הגלאי למערכת מדידה (bonding) זניחה):

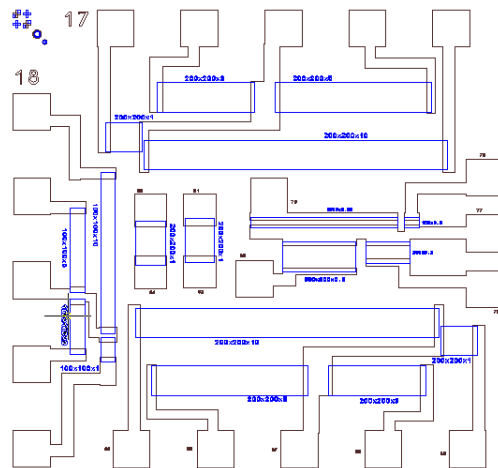
$$R = 2R_c + \frac{R_s}{W} L \quad (2.1)$$

כאשר L הוא המרחק בין המגעים, R_c התנגדות בין המגע למצע, R_s התנגדות הפיסה ו W רוחב הגלאי. תיאורה הגרפי של הנוסחה ניתן באיור 2.2 ב). הגרף מתאר את ההתנגדות כפונקציה של מרחק. מתוך תאור זה ניתן למצוא את R_s כאשר W נתון, מתוך מציאת השיפוע

$$\frac{dR}{dL} = \frac{R_s}{W} \quad \text{בנוסף ניתן למצוא את התנגדות המגעים למצע בעזרת } L_x = \frac{2R_c}{R_s} W.$$



(ב)



(א)

איור 2.2. (א) המסכה המתארת את הגלאים המתקבלים, הכוללת מגעים (שחור) ו MESA (כחול). (ב) גרף הכיול של התנגדות הפיסה כפונקציה של המרחק לאחר תהליך PL. (From: Modern GaAs processing methods by Ralph Williams p.235)

תהליך הפוטוליטוגרפיה התבצע בחדר הנקי שבמרכז לנו-מדע וננו-טכנולוגיה ע"ש משפחת הארווי מ' קרוגר באוניברסיטה העברית.

2.3.2 תהליך הספיחה של השכבה האורגנית וננו חלקיקים

לאחר הכנת הטרנזיסטור או סופחים את השכבה האורגנית ועל גביה את שכבת הננו חלקיקים. נציג כעת את תהליך הספיחה שבו השתמשנו, הצגת התהליך תהינה כוללנית לכל סוגי השכבות האורגניות ולכל סוגי הננו חלקיקים, בטבלה 2.1 מובאים הנתונים המדויקים של כל הספיחות למיניהן. התהליך המוצג הוא ספיחה על גבי גליום ארסניד, הליך הספיחה על סילקון דומה ברובו ומוצג בנספח ג.

ניקוי הדגם - תהליך ניקיון לפני ספיחה מתחיל בהטבלת הדגם באצטון ואתנול מורתחים למשך 10 דקות ואחר כך ניקוי ב plasma asher ל 10 דקות בעוצמה של 50%. plasma asher הוא למעשה הארה בקרני uv ובכך הוא מוריד את השארים האורגניים ומוסיף שכבה חמצנית בגובה של כ-1nm. על מנת להוריד את השכבה החמצנית הדגם הוטבל בתמיסת 2% HF למשך 5 שניות שטיפה במים ואחר כך בתמיסת אמוניום הידרוקסיד 25% (ammonium hydroxide (NH_3)) למשך כ 30 שניות ולבסוף שטיפה נוספת במים מזוקקים. מכאן ואילך תהליך הספיחה רגיש לחמצן לכן הוא מתבצע בתא סגור באווירת חנקן עד סופו.

ספיחת השכבה האורגנית - השלב הראשון של הניקוי הוא השריית הדגם למשך 20 דקות באתנול אבסולוטי. לאחר הוצאת הדגם מהאתנול האבסולוטי מכניסים אותו

לתמיסה האורגנית המכילה את מולקולות השכבה באתנול. השריית הדגם בתמיסה האורגנית היא למשך 18-24 שעות שבסופן שוטפים באתנול להורדת שאריות התמיסה האורגנית שלא נספחו.

ספיחת הננו חלקיקים- לפני הכנסת הדגם עם השכבה האורגנית לננו חלקיקים
שוטפים את הדגם בטולואן אבסולוטי שהוא הממס בתמיסת הננו חלקיקים. לאחר השטיפות אנו משרים את הדגם בתמיסת הננו חלקיקים למשך כ-3 שעות ושוטפים בשנית עם טולואן להורדת ננו חלקיקים לא ספוחים.

חומר הנספח	ממס	יחס (בהתאמה)	הערות
דיתיוול אליפטית- 1,9-נוננדיתיוול	אתנול	$5ml : 1\mu l$	הדיתיוול הוא בעל ריכוז של 95%
1,4-בנזן דימתאן תיוול	אתנול	_____	הבנזן הוא אבקה לכן היחס הוא $8.5 \cdot 10^{-4} gr$ ל $5ml$ אתנול
InAs InAs/CdSe	טולואן	_____	ננו חלקיקים אלו סונתזו במעבדת פרופ' אורי בנין לכן ריכוזם לא היה קבוע
PbS	טולואן	$1ml : 2.5\mu l$	הננו חלקיקים מגיעים בתמיסה עם יחס משקלי $4gr : 100ml$

טבלה 2.1 – ריכוזי התמיסות האורגניות והננו חלקיקים כפי שספחנו בעבודה זו

בעבודה זו מוצגות תוצאות גם לגלאים בעלי מספר שכבות. לשם יצירת גלאים אלו חזרנו על אותו הליך ספיחה כאשר זמן ההשריה הוא: 3 שעות לשכבה האורגנית 41 שעות לשכבת הננו חלקיקים. החזרה על ההליך היא לפי מספר השכבות הרצויות, אנו ספחנו עד כ-3 שכבות.

3. תוצאות ודיון

3.1 אפיון דגמים ובדיקת מעבר מטענים בטרנזיסטור בעל שכבת ננו חלקיקים

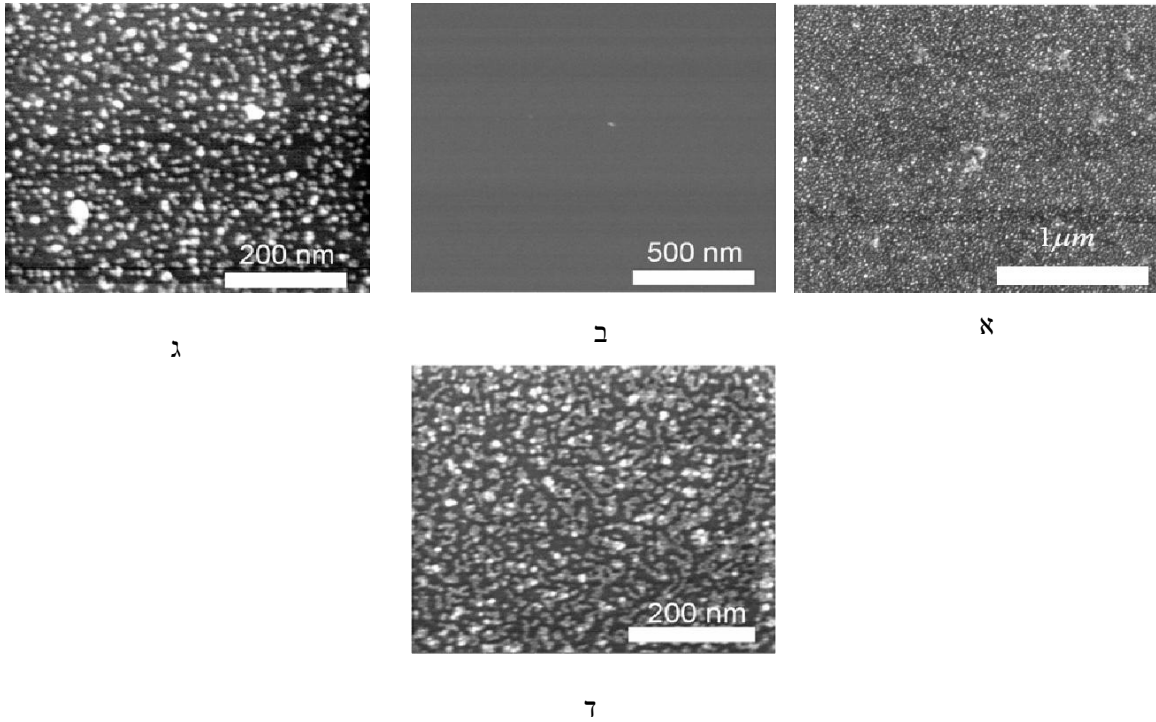
בודדת

3.3.1 אפיון הדגמים

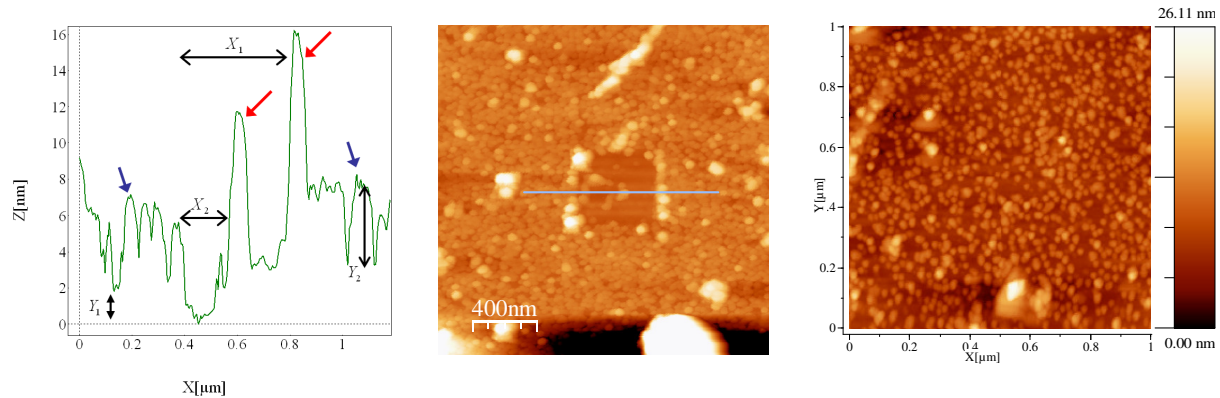
לשם הבנת מדידות מעבר מטען מננו חלקיק למצע דרך שכבה אורגנית, נדרשת הבנה של תצורת הספיחה על גבי המצע. הבנת מבנה פני השטח של הספיחה ניתנת על ידי אפיון הדגם ב HR-SEM ו AFM (סעיף 2.1). באיור 3.1 מופיעות תמונות של סריקות HR-SEM שנעשו על הדגמים עם ספיחה של InAs על גבי GaAs. מתמונות אלו ניתן להסיק כמה דברים, תחילה כי ספיחת הננו חלקיקים היא הומוגנית ובעלת כיסוי גבוה (3.1.1). בנוסף צפיפות הננו חלקיקים הינה בערך $22 \cdot 10^{10}$ לס"מ בריבוע עבור הדגם בעל שכבה אחת (3.1.2) ועבור הדגם עם 2 שכבות (3.1.3) הצפיפות של סך הננו חלקיקים עולה ל $40 \cdot 10^{10}$ לס"מ בריבוע, כמו כן בתמונת מצע GaAs אין ספיחה כלל (3.1.4). השוואה בין התמונות מראה שהספיחה של השכבה השנייה על גבי השכבה הראשונה היא דלילה יותר (נקודה בהירה מציינת שכבה עליונה) מהשכבה התחתונה וצפיפות השכבה הראשונה גדלה לעומת שכבה אחת (בערך ב- 50%). מלבד צפיפות השכבות ניתן ללמוד על גודלם של הננו חלקיקים ולקבל שקוטרים נע סביב $6nm$, בהתאם לגודלם בתמיסה. בשלושת תמונות הספיחה אפשר לראות נקודות בהן הספיחה יוצרת מבנים שנראים כמו צברים של ננו חלקיקים, על מבנים אלו נרחיב בהמשך.

תמונות ה SEM מספקות מידע על עצם קיום הספיחה ואיכותה אך לא על הטופוגרפיה המתקבלת, לכן ביצענו על הדגמים גם מדידות ב AFM (תמונה 3.2). ממדידות אלו עולה שגובהם הממוצע של הננו חלקיקים (תמונה 3.2.1) הוא סביב $6nm$, חישוב זה נעשה ביחס להערכת גובה השכבה האורגנית התיאורטי ($1.2nm$). את גובהה של השכבה האורגנית קשה יותר להעריך מתמונה זו בגלל אורכן הקצר של המולקולות. מלבד הגובה ניתן לראות מתמונה זו גם את הומוגניות הספיחה. ניסיון נוסף לאפיון גובה הספיחה נעשה על ידי שריטת הדגם עם טיפ ה AFM עד למצע (בתמונה 3.2.2), ועל ידי כך נמדד גובה הננו חלקיק ביחס למצע. בתמונה עצמה ישנם שני מלבנים, אחד בתוך השני. המלבן הגדול הוא שריטה ראשונית והמלבן הקטן הוא שריטה נוספת בתוכו. בתמונת החתך של הגובה (החתך הוא לאורך הקו בתמונת ה AFM עצמה (איור 3.2 (ב))) ניתן לראות את שני המלבנים, אורך המלבן הגדול מסומן ב X_1 ואורך השני ב X_2 . בשפת כל מלבן ישנו פיק גדול (מסומן בחץ אדום) הנובע מגריפת החומר הצידה. הסימון Y_1 מגדיר את גובה השכבה האורגנית ו Y_2 מייצג את גובה הננו חלקיקים, אחדים מהם מסומנים בחץ כחול לשם הבנת התמונה. מתוך מדידה זו ושגיאת המדידה של ה AFM (סעיף 2.1.2), ניתן להסיק שגובה

השכבה האורגנית הוא $1\text{nm} - 2\text{nm}$ וגובה הננו חלקיקים $5\text{nm} - 7\text{nm}$. כל תוצאות אפיון אלו תואמות את הנתונים של השכבה האורגנית והננו חלקיקים לפני הספיחה. דיון רחב יותר וניסוי שמטרתו להבהיר את אופי הספיחה של שכבות אחת על גבי השנייה ובתוך כך גם על הצברים הנוצרים, מתקיים ומתואר בסעיף הבא.



איור 3.1. תמונות SEM של ספיחה של ננו חלקיקים מסוג InAs על גבי GaAs. (א) שכבה אחת בהגדלה נמוכה. (ב) מצע GaAs ללא ספיחה. (ג) שכבה אחת של ננו חלקיקים. (ד) שתי שכבות של ננו חלקיקים.



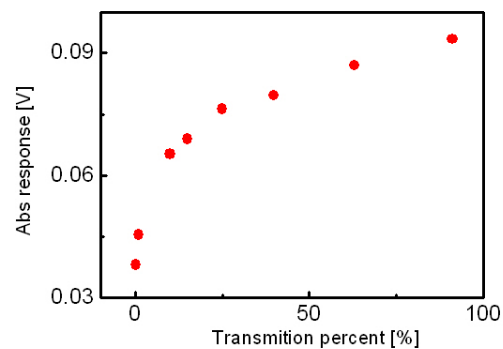
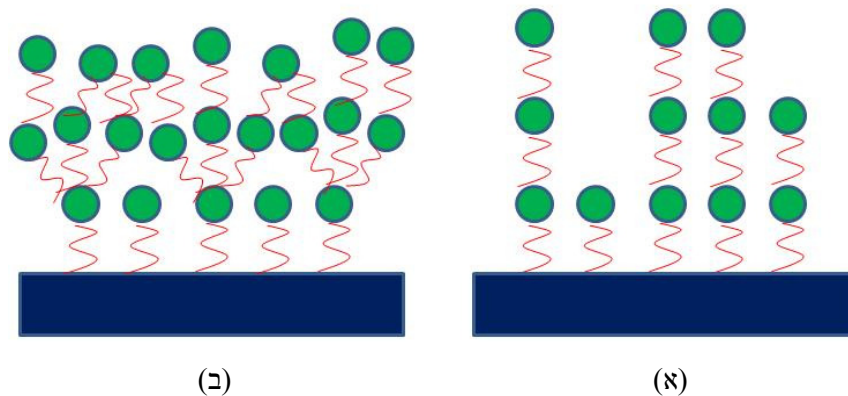
איור 3.2. תמונות של AFM של ספיחה של ננו חלקיקים מסוג InAs על גבי GaAs, ספיחה של שכבה בודדת. (א) אפיון גובה הננו חלקיקים. (ב) תמונת האזור המגורד בדגם. (ג) חתך ציר הגובה של תמונה (ב), החתך הוא לאורך הקו הכחול.

3.1.2 אפיון תצורת השכבות על ידי ניסוי של שינוי עוצמת ההארה

שאלה מרכזית שעלתה במשך העבודה היא כיצד ניתן לאפיין את מבנה השכבות הנספחות אחת על גבי השנייה. כפי שראינו בתמונות ה SEM הספיחה של שכבה שנייה ומעלה אומנם אחידה והומוגנית אך לא ניתן להצביע באופן ברור שהשכבות העליונות נספחו באופן מסודר על גבי השכבות מתחתיהם (איור (3.3) (א)), בנוסף כפי שראינו חלק מן הספיחה מתקבלת בצורת אגרגטים.

תצורה נוספת של ספיחה היכולה לעלות מצילומי ה SEM היא שהספיחה יוצרת מן צורת עץ (איור (3.3) (ב)) המורכבת ממולקולות אורגניות וננו חלקיקים. המשמעות של תצורת ספיחה זאת שצפיפות הננו חלקיקים משתנה משכבה לשכבה. כדי לבדוק אפשרות זו ניסינו לבדוק את תגובת הגלאי עבור עוצמות הארה שונות, על ידי ניסוי זה רצינו לבדוק מתי הגלאי מגיע לרוויה ולקשר את נקודת הרוויה למבנה השכבות. במילים אחרות, על ידי הארה בלייזר אנו מעוררים חלק מהננו חלקיקים כך שנוצרת הפרדת מטען ונושאי מטען יכולים לנוע לכיוון המצע. בהנחה שאכן נוצר מבנה שכבות לא אחיד, עבור עוצמה גבוהה נעורר את כל החלקיקים אך נושאי המטען המגיעים מהשכבות העליונות יצטרכו לעבור דרך השכבה הראשונה, כך שכל התהליך תלוי ביכולת וקצב המעבר של המטענים דרך השכבה הראשונה. על ידי השוואה בין גלאים שונים עם ספיחות בצפיפות זהה אך בתנאים שונים ניתן לחקור את קצב העברת האלקטרונים של השכבה התחתונה ובעצם ולבדוק האם נוצר צוואר בקבוק השולט בקצב ירידת המטען ובכך בתגובת הגלאי.

בניסוי מדדתי גלאי בעל 3 שכבות של ננו חלקיקים מסוג InAs, ההארה נעשתה על ידי לייזר 980nm שעוצמתו המכסימלית היא $120mW$. בשביל למדוד עוצמות שונות השתמשתי במנחית עוצמה אשר טווח ההעברה שלו הוא מ 0.001% עד 0.912%, בעת המדידות עצמם נלקחו כשמונה עוצמות שונות. מהתוצאות (איור (3.3) (ג)) ניתן לראות שככל שעוצמת ההארה גדלה תגובת הגלאי גדלה בהתאמה. העלייה בתגובה היא חדה תחילה ואז מתמתנת, אפשר לנסות להסביר זאת שבעוצמות נמוכות רק חלק קטן מהננו חלקיקים מעורר וכל שינוי קטן בעוצמה גורר שינוי משמעותי בתגובה. לעומת זאת בעוצמות היותר גבוהות (0.15%) רוב הננו חלקיקים כבר מעוררים, כך שאנו מתקרבים לנקודת הרוויה שנובעת מיעילות הבליעה וזמן החיים של האקסיטון. לכן תוצאה זו לא יכולה להעיד על הגעה של התגובה לרוויה בגלל שנוצר צוואר בקבוק בשכבה הראשונה. לעומת זאת ניתן לראות ממנה בבירור שככל שמעוררים יותר ננו חלקיקים תגובת הגלאי עולה, מסקנה העולה בקנה אחד עם המסקנות בגוף העבודה.

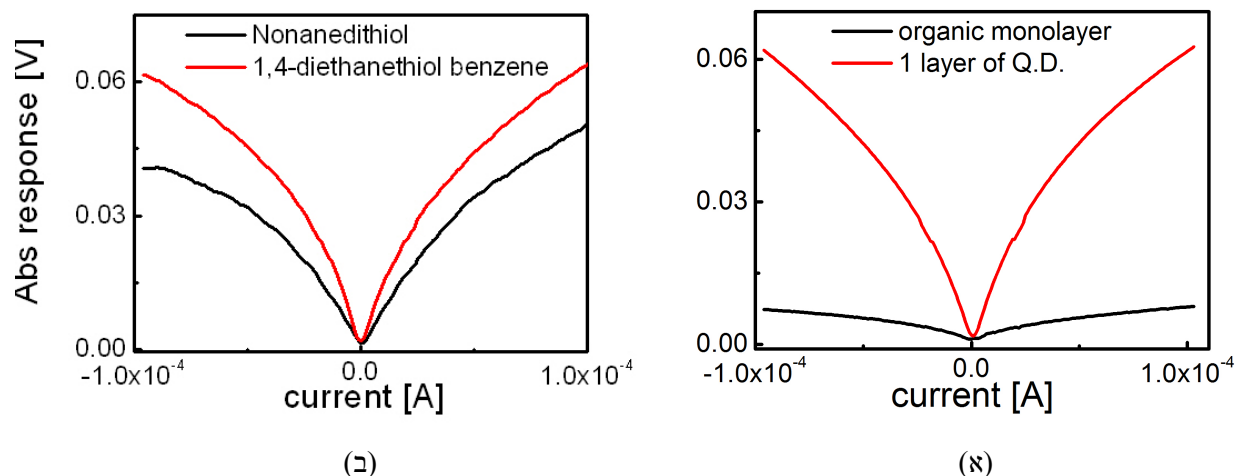


(ג)

איור 3.3. סכימה של הספיחות היכולות להתקבל במספר שכבות: (א) ספיחה היוצרת שכבה על גבי שכבה (ב) ספיחה היוצרת צורת "עץ". (ג) תגובת הגלאי כפונקציה של עוצמות שונות של הלייזר.

3.1.3 בדיקת מעבר מטענים בטרנזיסטור בעל שכבת ננו חלקיקים בודדת

באיור 3.4 (א) מתואר תגובת גלאי בעל שכבת ננו חלקיקים בודדת. הננו חלקיקים בגלאי זה הם מסוג InAs והשכבה האורגנית היא מולקולות 1,9-נוננדייתול. תגובת הגלאי מתוארת על ידי ההפרש במתח המתקבל (בערך מוחלט) בין מדידה בחושך ומדידה תחת הארה כפונקציה של הזרם המסופק לטרנזיסטור. ההארה בניסוי זה נעשתה על ידי לייזר $980nm$ בעוצמה של $120mW$. מתוך תוצאות אלו ניתן להסיק שהגלאי רגיש להארה, דבר התואם תוצאות של עבודות קודמות.¹² מכיוון שאופי פעולת הגלאי תלוי בהעברת המטען דרך השכבה האורגנית ביצענו מדידה המשווה את רגישות הגלאי כאשר שינינו את סוגי המולקולות האורגניות המקשרות בין המצע לננו חלקיקים. ההשוואה נעשתה בין מולקולות 1,9-נוננדייתול ומולקולות 1,4-בנזן דימתאן תיול, כאשר בשני הדגמים השתמשנו בננו חלקיקים מסוג InAs וספחנו על גבי GaAs. באיור 3.4 (ב) ניתן לראות את תגובת הגלאים השונים: 1,9-נוננדייתול (שחור) ובנזן (אדום). בשני המקרים הגלאי מגיב לאור וישנה השפעה של סוג השכבה האורגנית על העברת המטען. השפעת האור על גלאי הבנזן גדולה יותר מאשר על 1,9-נוננדייתול כמצופה,⁴¹ מכיוון שהבנזן הוא בעל אלקטרוני אל איתור והעברת המטען דרכו יותר יעילה (סעיף 1.3.2). ההבדל המתקבל לאורך כל הניסויים בין שני סוגי המולקולות נע בין 10% ל-25%, כאשר ניסויים אלו בוצעו על דגמים שהתנהגותם בחושך זהה. ההבדל בניסויים נובע מאופי הספיחה ומאיכות ההארה. לאחר ההוכחה שהגלאי מגיב לאור ניסינו לשפר את יעילותו על ידי ספיחת שכבות נוספות על פני השכבה הראשונה, תוצאות ניסוי זה יתוארו בסעיף הבא.

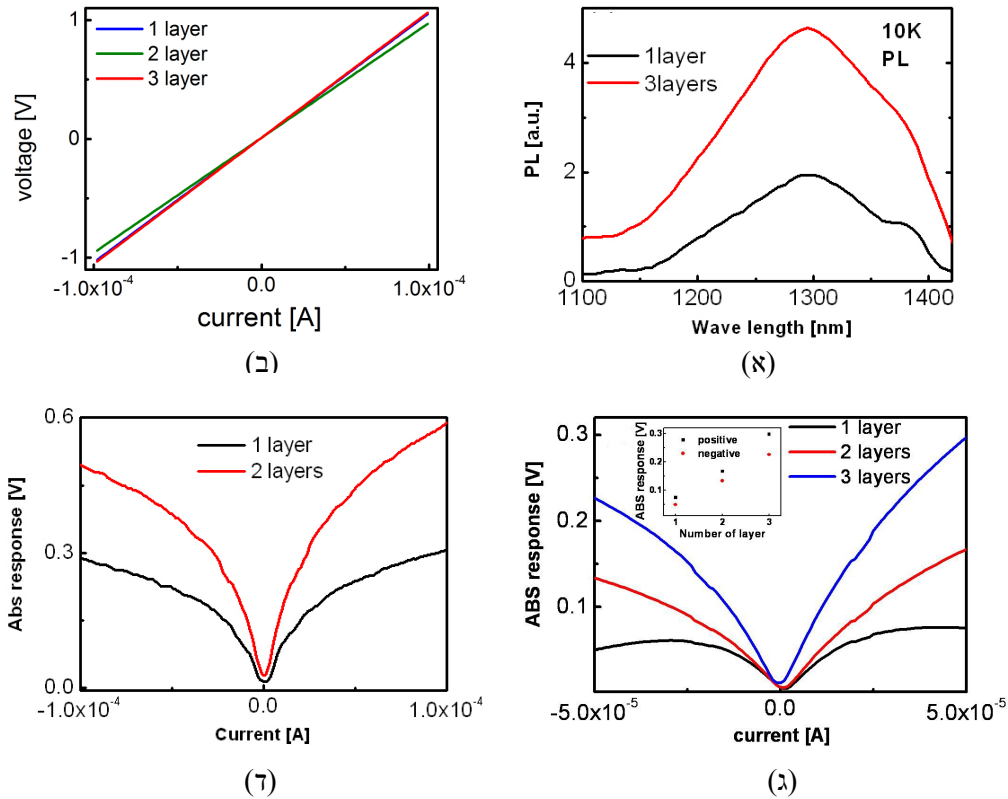


איור 3.4. (א) תגובת גלאי עם ספיחה של שכבה אורגנית בלבד (שחור) ועם ננו חלקיקים מסוג InAs (שחור). (ב) תגובת גלאים עם ננו חלקיקים מסוג InAs אך בעלי מולקולות אורגניות שונות: בנזן (אדום) ו-1,9-נוננדייתול (שחור).

3.2 מדידות חשמליות ואופטיות על התקנים רבי שכבות

השלב הבא בניסיון הבנת מעבר המטענים ושיפור תגובת הגלאי נעשה על ידי הכנת ומדידת גלאים בעלי מספר שכבות של ננו חלקיקים. השוואה בין מדידת PL (איור 3.5(א)) של שכבה בודדת ושלוש שכבות מספקת הבנה על ספיחה במספר שכבות. הננו חלקיקים שספחנו היו מסוג InAs על גבי מצע GaAs לא מסומם, המדידה נעשתה בטמפרטורה של $10K$ וההארה על ידי לייזר דיודה $1064nm$ כאשר גודל הכתם הוא $100\mu m^2$. ניתן לראות שישנו גידול במספר הננו חלקיקים לאחר הוספת שכבות נוספות. העלייה בעוצמת ה-PL צפויה לאחר הוספה של ננו חלקיקים למערכת על ידי ספיחת שכבות נוספות, במידה וזמן הפליטה לא משתנה. במדידה זו שלוש שכבות נתנו פיק הגבוה פי 2.5 מאשר שכבה אחת, דבר המעיד על התווספות ננו חלקיקים למערכת לאחר הספיחת הנוספות. חשוב לשים לב שתוצאות אלו לא מעידות על מבנה השכבות או על הסתדרות כלשהיא בשכבות אלא רק על גדילה במספר הננו חלקיקים.

דרך נוספת לאפיין את מספר הננו חלקיקים לאחר כל הוספת שכבה, היא לצמד אותם לטרנזיסטור בעל מוליכות גבוהה. הניסוי כלל שלושה דגמים שונים בעלי שכבה אחת, שתי שכבות ושלוש שכבות. מכיוון שהניסוי דורש השוואה בין שלושה דגמים שונים הזחים בגודלם, חשוב לוודא שהתנגדות הגלאים שלהם ללא הארה שווה (איור 3.5(ב)). המדידה של כל הגלאים נעשתה תחת אותם תנאי הארה (לייזר $980nm$) ובאותה מערכת. תגובת הגלאים ניתנת באיור 3.5(ג) על ידי השתנות המתח בהינתן זרם לטרנזיסטור, ניתן לראות בבירור שכאשר מוסיפים שכבת ננו חלקיקים תגובת הטרנזיסטור גדלה בעלייה במתח. בתמונה הממוזערת מוצגת תגובת הגלאים עבור זרם של $50\mu A$, הוספה של השכבות מגדילה את התגובה באופן הדומה לליניארי. בקירוב ראשוני, תוצאות אלו מעידות שתחת ההארה כל שכבה מוסיפה כמות שווה של מטענים העוברת מהננו חלקיקים לפני השטח. לבסוף החלטנו לבדוק את השפעת סוג הננו חלקיקים על תגובת הגלאי. בניסוי הבא ספחתי שתי שכבות של ננו חלקיקים מסוג PbS הפולטים סביב $1100nm$. באיור 3.5(ד)) מוצגת תגובת הגלאי עבור שתי השכבות, ניתן לראות שגם במקרה זה כמו בחלקיקי InAs תגובת הגלאי עולה בערך פי שתיים. ניסוי זה מחזק את ההנחה שכל שכבה מוסיפה כמספר מטענים דומה.



איור 3.5. (א) מדידת PL של גלאי בטמפרטורת 10K: שכבה אחת (אדום) ושלוש שכבות (שחור). (ב) התנגדות הגלאים ללא הארה. (ג) תגובת הגלאי להארה עבור זרמים שונים תוך כדי הגדלת מספר השכבות. בתמונה הממוזערת מוצגת תגובת הגלאים עבור זרם של $50\mu A$. (ד) תגובת גלאי עם ספיחה של PbS: שכבה אחת (שחור) ושלוש שכבות (אדום).

3.3 מדידות מקומיות של מעבר מטען בעזרת CL

שימוש במדידות Cathodoluminescence (CL) עבור אותם גלאים מבוססי ננו חלקיקים, יכול להגדיל את רזולוציית המדידה.⁵⁴ בגלל שקרן האלקטרונים מאוד ממוקדת, פגיעתה בדגם גורמת לפליטה מקומית.⁵⁵ איור 3.6(א)) מציג מדידות CL על הדגמים שלנו: שכבה אחת ושלוש שכבות של ננו חלקיקים מסוג InAs על גבי GaAs מסוג n. במדידות אלו השתמשנו בקרן אלקטרונים בעלת אנרגיה של 25KeV וגודל כתם (Spot size) של כ-4nm, צריך להזכיר שישנו גם עירור הנובע מפגיעת אלקטרונים משניים המגדיל את שטח האינטראקציה עם הקרן. התוצאות המוצגות באיור 3.5(א)) הן בעלות שתי תכונות בולטות:

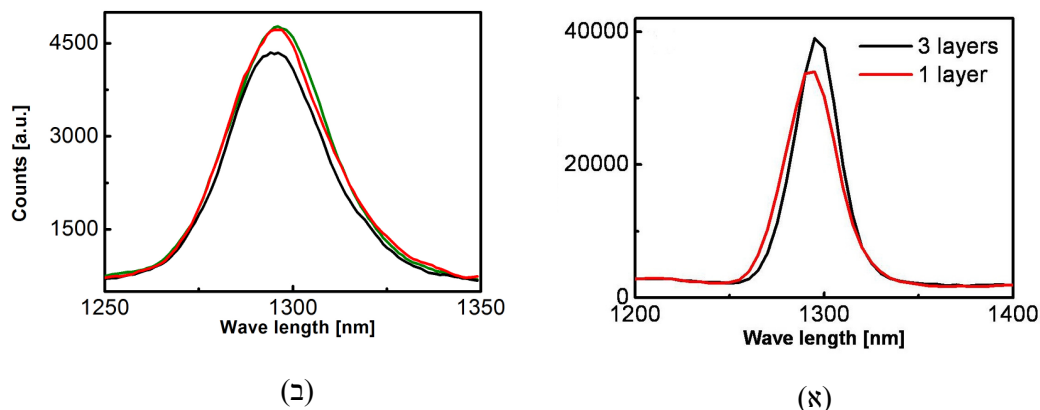
1. הפיק המתקבל במדידה זו צר יחסית ($\sim 30nm$) לפיק המתקבל במדידת ה-PL בטמפרטורה נמוכה של 10 K ($\sim 200nm$), תוצאה זו מרמזת על תופעה של תהודה במערכת.
2. ההבדל המתקבל בין הפיקים של שכבה אחת ושלוש שכבות הרבה יותר קטן ביחס להבדל המתקבל במדידות ה-PL.

צורת הפיק הצר התקבלה באותו אורך גל בכל מקום שנמדד על הדגם, לעומת זאת גובה הפיק לא נשאר קבוע עבור כל מדידה וזאת מאחר וצפיפות הספיחה אינה אחידה באופן מושלם. מתוך תוצאות אלו ניתן להסיק שישנו מנגנון מסוים השולט בפליטה CL בנוסף למנגנון של בליעה של פוטון אנרגטי יצירת אקסיטון ופליטה בפער של החלקיקים. מנגנון זה גורם לפיק להיות צר ופחות רגיש למבנה השכבות לעומת מדידות ה-PL.

מחקרים קודמים הראו שתחת תנאים דומים התוצאות המתקבלות במדידות CL ו-PL אמורות להיות דומות.⁵⁶ מכל מקום במקרה שלנו נראה שיש הבדלים בין המדידות וספקטרום הפליטה של מדידות ה-CL צר יותר באופן משמעותי.

הסבר בסיסי להבדל זה יכול לנבוי כתוצאה מהרחבה הומוגנית שונה. קרן האלקטרונים של מדידת ה-CL היא מסדר גודל של ננומטרים בודדים וגם אם נוסף את האלקטרונים המשניים הגורמים לכך שהשטח המעורר גדל, נגיע רק עד כדי חצי מיקרון. לכן מתקבל שעבור ה-CL רק כמות קטנה של ננו חלקיקים מעוררת לעומת כמות הננו חלקיקים המעוררת במדידת ה-PL, ומכיוון שרוחב הפיק תלוי בהתפלגות הגדלים של הננו חלקיקים, נקבל שעירור של פחות ננו חלקיקים נותן פיק יותר צר. הבדל זה נותן אינדיקציה על התכונות המקומיות של מדידות ה-CL. בהמשך נראה שהסבר זה נותן מענה חלקי בלבד ותוצאות שלנו.

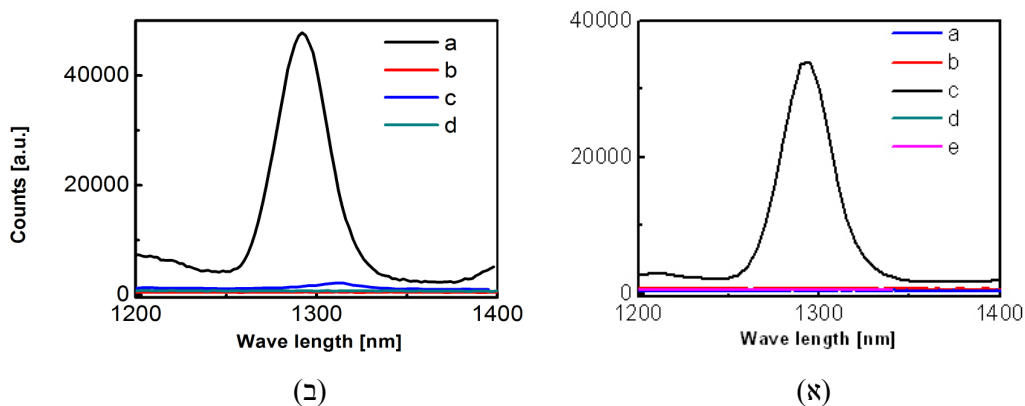
באיור 3.6(ב) מוצגות שלוש מדידות CL אשר נלקחו ממקומות שונים בדגם במרחקים של מיקרון לפחות אחד מהשני, במדידות אלו הפיק מתקבל באותו אורך גל 1290 ואותו רוחב. מתוך הדמיון הברור בתוצאות ניתן להבין שההסבר הקודם התלוי במספר וגודל הננו חלקיקים לא שלם, מכיוון שמדידה בנקודה אחרת על פני הדגם תשנה את מספר וגודל הננו חלקיקים הנמדדים. הפרמטרים של המדידה (כגון: מרחק מהדגם, עוצמה וכדומה) גורמים להבדלים בעוצמות המדידות, אך בגלל שמרכז ספקטרום הפליטה על פני הדוגמא לא משתנה, ההסבר לתיאור המדידה המשתמש בלוקאליות של הקרן לא מספק.



איור 3.6. (א) מדידת CL של גלאי: שכבה אחת (אדום) ושלוש שכבות (שחור). (ב) מדידת CL בנקודות שונות על פני הגלאי.

אנו מייחסים את מיקום וצורת הפיק המתקבל במדידות CL למגנון רזוננטי בין הננו חלקיקים למצע. איור 3.7 (א)) מראה שכאשר שיניתי את המצע של הגלאי הופיעו הבדלים משמעותיים בתוצאות הפליטה במדידת CL. מדידות על גבי מצעים שונים כמו: Si מסוג n בעל סימום של $5 \cdot 10^{17}$ לס"מ מרובע GaAs אינטרנזי הראו שרק על גבי GaAs מסוג n מתקבל ספקטרום פליטה צר ממדידת CL. חשוב לציין שעבור כל המצעים הספוחים בשכבה אורגנית בלבד, ללא ננו חלקיקים לא נמדדה פליטה סביב 1300nm (איור 3.7 (א)). מיפוי מצע של GaAs מסוג n בעזרת מדידות PL מגלה שמצע זה הוא בעל מצבי זיהום רבים בין היתר כאלו המתאימים לאורך הגל נמדד.²⁹ לעומת זאת בשני המצעים האחרים אין מצבי אנרגיה המתאימים לאורכי הגל הרלוונטיים.

הקשר בין סוג המצע לקבלת הפיק הוביל לבדיקת חשיבות הננו חלקיקים בהם אנו משתמשים. איור 3.7 (ב)) מציג את מדידות CL עבור סוגים שונים של ננו חלקיקים. כאשר מדדנו דגם עם חלקיקי SHELL/CORE מסוג InAs/ CdSe (גרף 3.7 (ב) שחור) קבלנו שוב פיק רזוננטי צר, ראוי לציין שספקטרום הפליטה של חלקיקים אלו סביב 1300nm הוא רחב בגלל ההרחבה האי הומוגנית (3.5 (א)). לעומת זאת כאשר מדדנו דגם GaAs מסוג n עם חלקיקי InAs (גרף 3.6 (ב) ירוק) או PbS (גרף 3.7 (ב) אדום) שספקטרום הפליטה שלהם הוא סביב 1100nm , לא קיבלנו פיק הדומה לפיק הרזוננטי ב- 1290nm נומטר. תוצאות אלו וכן הממצאים של המדידות על מצעים שונים מובילים למסקנה שישנו קשר בין סוג הננו חלקיקים (אורך הגל הנפלט מהם) והמצע עליו הם ספוחים (רמות האנרגיה שלו) לבין הפיק המתקבל במדידות CL.

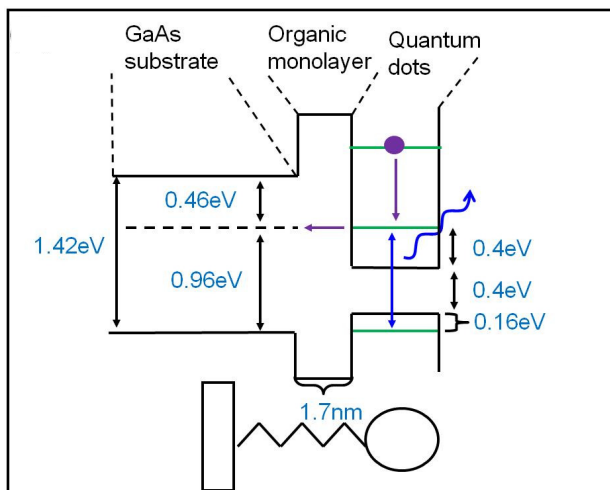


איור 3.7. (א) מדידת CL של חלקיקי InAs core (בעלי פליטה סביב 1300nm) על גבי מצעים שונים; רק עבור מצע של GaAs מסוג n מתקבל פיק (c). בתור רפרנס מדדנו גם מצע בלבד (a) ומצע עם שכבה אורגנית (b). בנוסף מדדנו גם את אותם חלקיקים על גבי GaAs אינטרנזי (d) וסילקון (e). (ב) כאשר השתמשנו InAs core shell (בעלי פליטה סביב 1300nm) על גבי מצע GaAs מסוג n קיבלנו פיק עבור אותו האורך גל (a), מצד שני עבור חלקיקי PbS core (b) ו InAs core (d) הפולטים סביב 1100nm לא מתקבל סיגנל. בדומה לאיור 3.6. (א) גם כאן עבור דגם ללא חלקיקים לא מתקבל פיק (c).

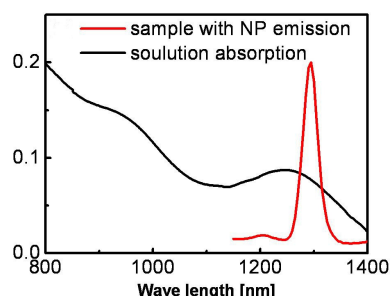
באיור (3.8 א)) מוצגת מדידת CL של חלקיקי InAs (אדום) על גבי מצע GaAs מסוג n וכן גרף הבליעה של תמיסת חלקיקים אלו (שחור). ניתן לראות בברור שפיק ה CL צר בהרבה מסיגנל הבליעה של התמיסה וששניהם סביב אותם אורכי גל, כך שניתן להסיק שהפליטה היא אכן מהננו חלקיקים. אנו מיחסים את הצרות של הפיק ואורך הגל בו הוא מתקבל, לקשר תהודה שמתקיים בין מצבי האנרגיה של המצע לננו חלקיקים דרך השכבה האורגנית.

באיור (3.8 ב)) אנו מציעים מודל אפשרי המסביר את תוצאות המדידה ב CL שראינו עד כה. במודל זה הננו חלקיקים נטענים במדידת ה CL על ידי קרן האלקטרונים שהיא כאמור בעלת אנרגיה גבוהה (2.2.1). בניגוד למדידות CL סטנדרטיות לחומרים, במדידות שלנו שכבת הננו חלקיקים מצומדת למצע שבולע את חלק מאנרגיית האלקטרונים. טעינת הננו חלקיקים מונעת מהם לפלוט פוטון⁵⁷ ובכך נמנע פיק רחב המתקבל במדידת PL. מניעת הפליטה היא על ידי כך שלא יכול להיווצר אקסיטון בננו חלקיק בגלל שהרמה האנרגטית (lowest unoccupied molecular orbital) LUMO כבר מלאה באלקטרונים מהקרן.

עבור חלקיקי ה InAs בגודל ספציפי ישנן רמות אנרגטיות ב LUMO הנמצאות ברזוננס עם רמות אנרגיה במצע ה GaAs מסוג n.²⁹ במצב של רזוננס בין הננו חלקיקים למצע, אלקטרונים עוברים מהננו חלקיקים הטעונים למצבי האנרגיה במצע (חץ סגול) ובכך נוצר מצב שהננו חלקיקים יכולים לפלוט פוטון. זמן הפריקה נשלט על ידי יעילות מעבר האנרגיה בין הננו חלקיקים למצע. מודל זה מסביר את הפיק הרזוננטי והצר בכך שהפליטה מתקבלת רק מהננו חלקיקים שלהם מצבי אנרגיית ה LUMO מתאימים לרמות האנרגיה במצע, בכך מודל זה בורר רק סוג מסוים של ננו חלקיקים. במדידות PL היוצרות אקסיטון על ידי הארה לכן אנו לא מצפים לטעינת הננו חלקיקים, כך שלא צפויה הצרת הסיגנל כמו ב CL ונקבל את מלוא ההרחבה האי הומגנית.



(ב)



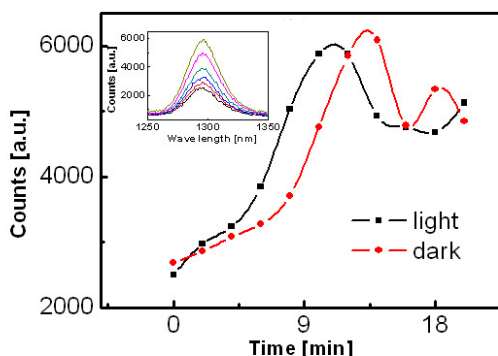
(א)

איור 3.8. (א) ספקטרום הבליעה של תמיסת ננו חלקיקים מסוג *InAs* (שחור) לעומת הפיק המתקבל במדידת CL של גלאי עם אותם החלקיקים על גבי *GaAs* מסוג *n* (אדום). (ב) מודל אפשרי לתוצאות ה CL על ידי מעבר רזוננטי בין ננו חלקיק טעון לבין רמת אנרגיה ב *GaAs* דרך השכבה האורגנית.

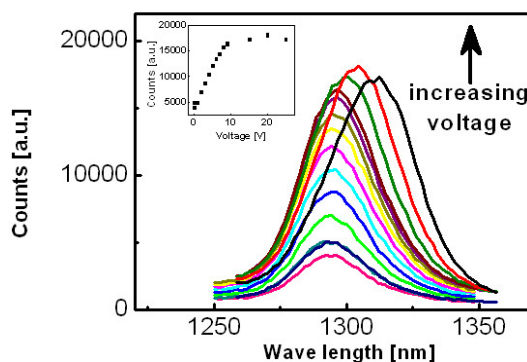
אם המודל המוצג הוא נכון, בעזרת מדידות CL אנו בוחנים את מעבר המטען אך ורק מהשכבה הראשונה במערכת, כך שניתן להסביר את איור 3.6 (א). באיור זה ראינו שיטת הבדל קטן במדידת ה CL בין שכבה אחת לשלוש (בניגוד למדידות PL). בעבר כבר נעשה שימוש בטכניקת ה CL במדידות על ננו חלקיקים.⁵⁸ החידוש כאן הוא ניצול האפקט של צימוד רזוננטי מקומי בין הננו חלקיקים ומצבי האנרגיה במצע בכדי למפות בצורה מקומית מעבר מטען במערכות הכוללות שכבה אורגנית וננו חלקיקים, כמו שניתן לראות באיור 3.6 (ב).

מכיוון שהמודל מסתמך בעיקרו על מצבי אנרגיה במצע עצמו, סביר להניח שלטעינת או פריקת המצע עצמו על ידי הפעלת מתח תהיה השפעה על המדידות עצמן. בעזרת נידוף מתכות בקצוות הדגם הצלחתי למדוד CL כאשר הדגם נמצא תחת מתח. המתח שסופק היה מקביל לשכבה האורגנית ולפני השטח. איור 3.9 (א) מציג מדידת CL כפונקציה של המתח הנופל על הדגם. ניתן לראות בברור שכאשר מגדילים את המתח גובה הפיק עולה (תמונה ממוזערת) ומתרחב מעט. כאשר המתח המופעל עולה מעל 10V גובה הפיק הוא פי ארבע מגובה הפיק במתח 0V, בנוסף במתחים גבוהים יותר ישנה גם הזזה באורך הגל בו מתקבל הפיק. את השינוי בגובה ניתן להסביר על ידי המודל שהצגנו. כאשר מופעל מתח על הדגם, האלקטרונים הנמצאים ברמה אנרגטית במצע מואצים לכיוון הקתודה כך שהרמה האנרגטית מתפנית ואלקטרון אחר יכול לעבור מהננו חלקיקים ולאכלס אותה, כך אנו מבצעים פינוי יזום של רמות האנרגיה במצע. לפי הסבר זה ככל שנעלה את המתח אנו נגדיל את קצב פינוי הרמות ונאפשר ליותר ננו חלקיקים לפלוט, ובכך להגדיל את הסיגנל המתקבל. התזוזה של מיקום הפיק באורך גל במתחים גבוהים יכולה לנבוע משינויים במבנה הרמות תחת מתח,⁵⁹ הסבר אפשרי נוסף לתזוזה באורך הגל הוא

שהרמות האנרגטיות במצע עצמו זזו בעקבות אפקט שטרק (Stark effect)⁶⁰ הגורם לשינוי הפליטה של ננו חלקיקים תחת שדה חשמלי ובכך משנה את תנאי הרזוננס של המערכת. המודל שהוצג תלוי בטעינה ופריקה של הננו חלקיקים השולטים בתכונות הפיק הרזוננטי המתקבל, כך שהפיק משתנה בצורה איטית (דקות). איור (3.9 ב)) מתאר את השינוי בסיגנל אשר מתאפיין בהגברתו, ניסוי זה נעשה בחושך ותחת הארה של מצלמת אינפרא אדום (920nm). התמונה הממוזערת מציגה את העלייה בסיגנל כאשר מרווחי הזמן הם 2 דקות בין כל מדידה. תוצאות אלו חוזרות על עצמם גם לאחר זמן ממושך בה המערכת חוזרת למצבה ההתחלתית.



(ב)



(א)

איור 3.9. (א) פיק ה-CL כפונקציה של המתח הניתן על פני הדגם בעזרת שני מגעים במרחק $500\mu\text{m}$ אחד מהשני. הפיק עצמו גדל ככל שהמתח גדל מ 0V ל 9V . בנוסף נראה בברור תוויה לאדום של שיא הפיק במתחים הגבוהים: ירוק - 15V , אדום - 20V , שחור - 25V . בתמונה הממוזערת מוצג מקסימום הפיק כפונקציה של המתח המופעל. (ב) תלות שיא מדידות ה-CL בזמן בחושך ותחת הארה (920nm). שיא הגובה גדל בצורה איטית בזמן. בתמונה הממוזערת מוצגת ה-CL הנמדדת בהפרשים של 2 דקות ללא הארה.

פריקה של ננו חלקיקים ידועה בתור תופעה איטית אשר קורית על פני סקאלות ארוכות זמן (דקות).⁶¹ בהתאם לתכונה זו הפיק במדידות ה-CL סביב 1300nm גדל בצורה איטית ומגיע ליציבות לאחר כ-13 דקות. תחת ההארה של מצלמת האינפרא אדום זמן ההגעה למצב יציב הוא 9 דקות. את ההבדל בזמני הפריקה תחת וללא הארה ניתן ליחס למטען המצטבר על פני השטח, בהשאלה אפשר להבין זאת בתור שינוי מתח בשער טרנזיסטור.⁶¹ ניתן לייחס את התהליך האיטי המוצג כאן לזמן פריקה מקומי של ננו חלקיק.

4. סיכום ומסקנות

בעבודת מחקר זו ביקשנו להבין את מעבר המטען/אנרגיה מננו חלקיק למצע מוליך למחצה ברכיבים שבהם הם מוצמדים על ידי שכבה אורגנית. התקווה היא שהבנת מעבר מטען/אנרגיה במערכת זו תסייע בשיפור רכיבים מעורבים ובהגדלת יעילותם. בנוסף היכולות למפות מעברי מטען אלו על ידי מדידות CL מקדם את אפיון התקני הננו חלקיקים. במסגרת זו התקבלו המסקנות העיקריות הבאות:

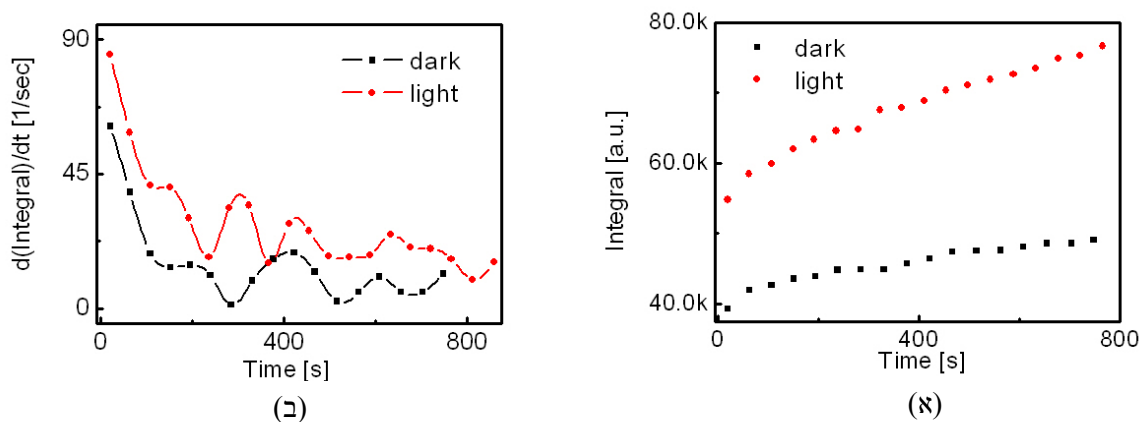
- מצאנו פיק רזוננטי במדידות CL של גלאי המורכב ממצע GaAs שעליו ספחנו ננו חלקיקים כאשר שכבה אורגנית היא המקשרת בניהם. הראנו שפיק זה רגיש למצע הנבחר, סוג הננו חלקיקים והשכבה האורגנית. לבסוף הוצע מודל המייחס את הפיק לתנאי רזוננס הנוצרים בין רמות אנרגיה במצע לבין רמות LUMO הננו חלקיק. לפי מודל זה מעבר מטען מקומי דרך שכבה אורגנית יכול להיבחן על ידי שימוש במצע וננו חלקיקים מתאימים. ההבנה של תהליכים אלו תאפשר להשתמש בסיגנל המתקבל למיפוי של מעבר מטען ברכיבים מעורבים מהסוג הזה.
 - הוכחנו שישנה יכולת לייצור גלאי רגיש לאור בטמפרטורת החדר. גלאי זה מבוסס ננו חלקיקים הספוחים בעזרת שכבה אורגנית על גבי טרנזיסטור FET ומהווים את השער ברכיב. הראנו שניתן לשלוט בגלאי זה על ידי שינוי סוג הננו חלקיקים או שינוי השכבות אורגניות. כמו כן הוכחנו שיעילות גלאי זה משתפרת ככל שמגדילים את מספר השכבות.
- במחקר זה נעשה שימוש נרחב ב-Cathodoluminescence (CL). למדנו לעבוד עם כלי מחקרי זה ועם חלק נרחב מאפשרויות המדידה בו. אנו מקווים שמסקנות עבודה זו תגדיל את השימוש בכלי זה לשם אפיון מבנים ננו מטרים נוספים.

5. עבודה עתידית

5.1 מדידות של טעינת ופריקת ננו חלקיקים באמצעות CL

בעבודה זו כבר ראינו את השפעת זמני הטעינה והפריקה של הננו חלקיקים על מדידות ה-CL (סעיף 3.3), בפרט השינוי בגובה הפיק (איור 3.9 (ב)). ניתן לנסות לקחת את אפיון תופעות אלו שלב אחד נוסף ע"י ניתוח נוסף של התוצאות מכיוון אחר. כאשר בוחנים את השתנות סך הקריאות בסיגנל בזמן, מקבלים עליה מונוטונית וכן הבדל בין מדידה בחושך למדידה בהארה (איור 5.1 (א)). הבדל זה מתאפיין שבהארה כמות הקריאות גדולה יותר וזאת כי קצב העירור תחת הארה גדול יותר.

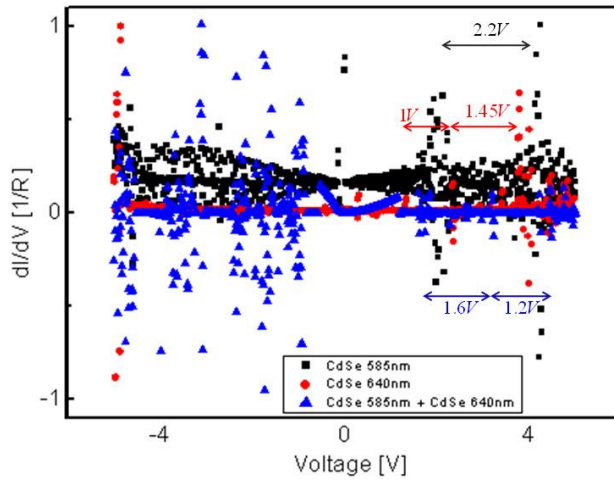
בשביל לבחון את התנהגות מספר הקריאות, ביצענו גזירה שלו לפי הזמן (איור 5.1 (ב)). תוצאה זו היא עדיין ראשונית ולא מלאה, אך נראה בבירור שישנה התנהגות המאפיינת את כמות הקריאות בגלל הדמיון הברור בין מדידות החושך וההארה. צריך לשים לב שבאיור הנקודות המלאות הן המדידות עצמן והקו המחבר הוא רק לצורך הנחייה. בשביל לנסות להתאים את ההתנהגות לפונקציה כלשהיא בצורה מדויקת צריך לקבל מדידה בעלת צפיפות נתונים גבוה יותר (בזמן). דבר זה הוא בעייתי במדידות ה-CL כי קיצור זמן המדידה יבוא על חשבון טווח אורכי הגל הנמדדים ורזולוציית המדידה בכל אורך גל ובכך על איכות ודיוק התוצאות.



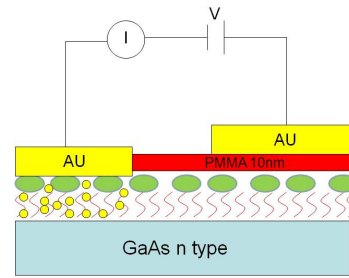
איור 5.1. (א) סך הקריאות בסיגנל כפונקציה של הזמן. (ב) גזרת כמות הקריאות לפי הזמן.

5.2 מדידות מעבר מטען דרך ננו חלקיקים בהזרקה ישירה

כחלק מהניסיון להבין את מעבר המטען דרך הננו חלקיקים ביצענו ניסוי בו המטענים הוזרקו בצורה ישירה ולא דרך ההארה.⁶² עבור ניסוי זה הכנו דגם הספוח בשכבה אחת/שתיים של ננו חלקיקים ועליו בעזרת ספינר יצרנו שכבה של PMMA בעובי 10nm . על גבי הדגם נודפו מגעים כך שבצד אחד המגע מגיע עד לדגם ובצד השני המגע מונח על שכבת ה-PMMA. את הדגם הכנסנו למערכת מדידה VI (איור 5.2 (א)). הרעיון מאחורי רכיב זה הוא שהזרם חייב לעבור ישירות דרך הננו חלקיקים למצע ומשם למגע השני, אם המגע השני גם על גבי ה-PMMA נקבל רכיב שונה אך מעניין שבו הזרם זורם דרך ננו חלקיק פעמיים. תוצאות המדידות מוצגות באיור 5.2 (ב) והן מתארות את נגזרת הזרם לפי מתח, בנוסף הנגזרת מנורמלת לשם השוואה בין הניסויים השונים. הניסויים כללו ספיחה של CdSe הבולעים סביב 640nm (אדום), CdSe הבולעים סביב 585nm (שחור) ודגם עם שתי שכבות של CdSe 640nm ו-CdSe 585nm (כחול). ניתן לראות שעבור שלושת סוגי הספיחה מתקבלים פיקים בנגזרת, פיקים אלו מעידים על קפיצות בזרם עבור מתחים שונים. קפיצות אלו יכולות לנבוע מתופעת Coulomb blockade (CB) הגורמת להתנגדות משתנה ברכיבים בעלי קיבול קטן (10^{-15}). אם אכן מדובר בתופעת CB הרווחים בין הפיקים צריכים להתאים ל- e/C כאשר e הוא מטען אלקטרון ו- C הוא קיבול הננו חלקיק שזהו המתח שצריך בשביל לטעון את הננו חלקיק באלקטרון נוסף.⁶³ עבור הננו חלקיקים שבניסוי זה הקיבול הוא מסדר גודל של $10^{-19} - 10^{-18} \text{F}$,⁶⁴ לכן ערכו של הגודל e/C יוצא סביב 1V . באיור 5.2 (ב) מסומנים בחיצים הפרשי המתחים בין זוג פיקים שכנים כאשר כל צבע חץ מותאם לצבע המדידה (אדום ל- 640nm CdSe והלאה). ניתן לראות שההבדלים בין הפיקים הם מאותו סדר גודל של החישוב התיאורטי. תוצאות אלו הן ראשוניות כך שנדרשת עוד עבודה רבה אבל כן ניתן לראות שישנה כאן תופעה המתקבלת בעקבות מעבר הזרם דרך הננו חלקיק.



(ב)

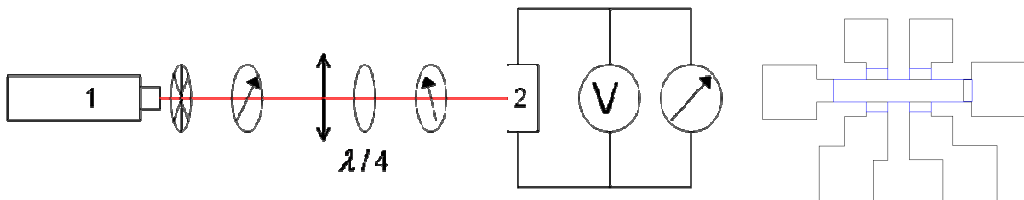


(א)

איור 5.2. (א) הדגם ומערכת המדידה. (ב) נגזרת הזרם כפונקציה של המתח עבור שלושה דגמים: CdSe הבולעים סביב 640nm (אדום), CdSe הבולעים סביב 585nm (שחור) ודגם עם שתי שכבות של CdSe 585nm ו-CdSe 640nm (כחול). החצים מתארים את ההפרשים בין פיקים שכנים וצבעם תואם למדידה.

5.3 מדידות אפקט הול

כאשר מעירים על הננו חלקיקים בעזרת אור מקוטב או מעוררים אלקטרונים בעלי ספין מסוים. אזי על ידי ערעור של כמות גדולה של חלקיקים או יכולים לייצור שדה מגנטי מקומי, שדה זה משפיע על פני המצע ויכול לגרום לאפקט הול. את עובדה זה אפשר לנצל לאפיון המעבר מטען מננו חלקיקי למצע על ידי הארה באור מקוטב מעגלי ומדידת מתח הול. הארה באור מקוטב מעגלית בכיוון ההפוך אמורה לתת את אותו מתח הול רק בסימן הפוך ומדידת מתח הול בקיטוב ליניארי צריכה לאפס את מתח הול. את המדידות ביצענו על גלאי מתאים כך שהזרם הניתן ומתח הול הנמדד מאונכים זה לזה איור 5.3 (א), במערכת המתוארת באיור 5.3 (ב). התוצאות שקיבלנו הם מאוד ראשוניות אך מעידות על הבדלים ביו הסיגנלים עבור הקיטובים השונים.



(ב)

(א)

איור 5.3. (א) הגלאי בו השתמשנו בניסוי. (ב) מערכת המדידה הכוללת: 1. לייזר. 2. הקרן עוברת דרך מנחית עוצמה, מקטב, עדשה מרכזת, לוחית $\lambda/4$ ומקטב נוסף בשביל ליצור קרן מקוטבת מעגלית (המקטב האחרון נועד רק לכיול ובמדידה עצמה מורד). תא הדגם מחובר במקביל לספק זרם ומד מתח.

נספחים

נספח א - מודל חלקיק בבור פוטנציאל כדורי אינסופי

בכדור הפוטנציאל $V(r)$ תלוי רק ברדיוס והוא נקרא פוטנציאל מרכזי כאשר

$$V(r) = \begin{cases} 0 & r < a \\ \infty & r > a \end{cases}$$

a הוא רדיוס החלקיק. כאשר פותרים את הבעיה בקואורדינטות ספריות הפתרון הינו:

$$\phi_{n,l,m} = C \frac{J_l(k_n, l, r) \cdot \psi_l^m(\theta, \varphi)}{r} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad l = 0, 1, 2$$

J_l – Besel function (1.א)

ψ_l^m – harmonic function

כתוצאה מתנאי שפה של התאפסות הפונקציה רק ערכי k_n, l מסוימים מותרים, אלה בעצם האפסים של פונקצית בסל.

$$k_{n,l} = \frac{\alpha_{n,l}}{a}$$

בערכים אלו פונקצית הגל מתאפסת על פני השטח דבר המכתיב את האנרגיות המותרות

$$E_{n,l} = \frac{\hbar^2 k_{n,l}^2}{2m_0} = \frac{\hbar^2 \alpha_{n,l}^2}{2m_0 a^2} \quad (2.א)$$

החלק הזוויתי של הבעיה דומה למקרה של אטום המימן גם בו הפוטנציאל מרכזי אך באטום המימן ישנה את ההגבלה של $l = n - 1$ לעומת ננו חלקיקים שעבורם אין את המגבלה הזו. פונקצית הגל ההרמונית היא פונקציה סימטרית ולא תלויה בזווית וניתנת על ידי:

$$\Psi_{1s}(r) = \sqrt{\frac{2}{a}} \frac{\sin(\frac{\pi r}{a})}{r} \quad (3.א)$$

שזהו המודל עבור פוטנציאל מרכזי בחלקיק בכדור, האנרגיות המתקבלות הם כמו של אטומים, מאותה סיבה נקראים הננו חלקיקים artificial atoms. בהתאמה לננו חלקיקים נבצע את הקירובים הבאים:

1. מסה אפקטיבית.
2. פונקצית המעטפת.
3. קירוב התיחום הקוונטי החזק.

מסה אפקטיבית – במוליך למחצה (מל"מ) ידוע ש- $v_g \propto \frac{dE}{dk}$ כאשר k, E הם אנרגיה

ותנע בהתאמה של נושא המטען v_g היא מהירות האלקטרון לכן אם נשווה בין ההספק המתקבל מהשדה החשמלי לבין השינוי באנרגיית האלקטרון ליחידת זמן נקבל:

$$\frac{d(\hbar k)}{dt} = qF$$

F הוא הכוח הפועל על נושא המטען, ניתן לראות שנגזרת התנע הגבישי שווה לכוח החיצוני כך שבעצם כל שאר הכוחות הפנימיים כלולים בתוך עקומת $E - k$. כעת ניתן לקבל את התאוצה מתוך נגזרת המהירות

$$a = \frac{qF}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$$

ומתוך השוואה לתאוצה הנויטונית מקבלים ביטוי למסה האפקטיבית:

$$m_e^* = \hbar^2 \left[\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right]^{-1}$$

המסה האפקטיבית נקבעת ע"י רדיוס העקמומיות של עקומת $E - k$ בנקודות הקיצון שלה, היא כוללת את כל השפעות השדות הפנימיים. מתוך זה ניתן לקבל את הקירוב הפרבולי של פסי האנרגיה:

$$E_c(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}, \quad E_v(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (4.א)$$

קירוב פונקצית המעטפת Envelope function approximation - כאשר אנו עוסקים בפונקצית הגל של האלקטרון והחור אנו מתייחסים לנו חלקיקים (נ"ח) כבעלי מבנה זהה למוצק ומניחים שהחלק המחזורי של פונקצית הגל דומה לזה של המוצק עצמו, לכן אנו יכולים לרשום את פונקצית הגל כמכפלה של פונקצית בלוך ופונקצית מעטפת.

$$\psi_{single}^{particl}(r) = \sum_k \underbrace{U_{n,k}}_{bloch\ function} C_{n,k} e^{i\vec{k}\vec{r}} \quad (5.א)$$

מניחים שהתלות של פונקצית בלוך ב k קטנה לכן נוכל לרשום:

$$\psi_{single}^{particl}(r) = U_{n,0}(\vec{r}) \cdot f_{sp}(\vec{r})$$

$f_{sp}(\vec{r})$ – Single particle envelope wave function

התייחסות של נ"ח הוא תלת ממדי ופונקצית המעטפת תתייחס לכל המימדים, בצורה זו נרשום בעזרת קירוב (linear combination of atomic orbitals (LACO))

$$U_{n,0}(\vec{r}) = \sum_i C_{n,i} \varphi_n(\vec{r} - \vec{r}_i)$$

בעצם קירוב זה נותן לנו את האפשרות להניח שעבור חלקיק שגודל משמעותית מקבוע הסריג של המוצק, המודולציה של הפונקציה הינה של פונקצית המעטפת. בשביל לחשב את פונקצית המעטפת נשתמש בקירוב שלישי.

קירוב התייחסות הקוונטי החזק - אנו למעשה פותרים המלטוניאן של אלקטרון וחור כחלקיק בכדור ולכן הוא כולל את איבר האינטראקציה (קולומבי) בניהם ואיברי האנרגיה והתייחסות של שניהם.

$$\hat{H} = -\underbrace{\frac{\hbar^2 \nabla_e^2}{2m_e^*}}_{\text{Electron kinetic}} - \underbrace{\frac{\hbar^2 \nabla_h^2}{2m_h^*}}_{\text{Hole kinetic}} - \underbrace{\frac{e^2}{\epsilon |r_e - r_h|}}_{\text{Electron hole coulomb coupling}} + \underbrace{V_e(r_e)}_{\text{electron confinement potential}} + \underbrace{V_h(r_h)}_{\text{hole confinement potential}} \quad (6.א)$$

המילטוניאן זה אינו פריק ומונע פתרון ע"י הפרדת משתנים בגלל איבר האינטראקציה. בשביל לפתור את ההמלטונין הזה אנו נשתמש בהנחה שאנו מתעסקים בחלקיקים מספיק קטנים כך שמתקיים

$$\frac{1}{r} \ll \frac{1}{r^2}$$

כאשר r הוא רדיוס הכדור, כך אנו מקבלים שהאנרגיה הקולומבית שמתנהגת כ $\frac{1}{r}$ קטנה

בהרבה מאיבר התיחום הקוונטי שמתנהג כ $\frac{1}{r^2}$, בעצם הנחה היא $r \leq a_B$ כאשר a_B הוא רדיוס

בוהר, לפיכך אנו נוניח את האיבר הקולומבי ונכניס אותו בשלב יותר מאוחר כתיקון. כעת נקבל המלטונין מהצורה:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2 \nabla_e^2}{2m_e^*} - \frac{\hbar^2 \nabla_h^2}{2m_h^*} + V_e(r_e) + V_h(r_h)$$

ואותו ניתן לפתור בעזרת הפרדת משתנים עבור אלקטרון וחור, נקבל

$$\psi_{(\vec{r}_e, \vec{r}_h)} = \psi_{e(\vec{r}_e)} \cdot \psi_{h(\vec{r}_e, \vec{r}_h)} = U_c f_e(\vec{r}_e) U_v f_h(\vec{r}_h)$$

כעת נניח פונקצית מעטפת כדור בעל מחסום אינסופי נוכל לרשום את פונקצית הגל בעזרת פונקציות בסל

$$\psi_{(\vec{r}_e, \vec{r}_h)} = [U_c \frac{j_{ie}(k_{n_e l_e}, r_e)}{r_e} \psi_{l_n}^{m_n}] \cdot [U_v \frac{j_{ih}(k_{n_h l_h}, r_h)}{r_h} \psi_{l_h}^{m_h}] \quad (7.א)$$

מכאן האנרגיות נתונות ע"י:

$$E_{(n_e, l_e, n_h, l_h)} = E_g + \frac{\hbar^2}{2a^2} \left\{ \frac{\alpha_{n_e, l_e}^2}{m_e^*} + \frac{\alpha_{n_h, l_h}^2}{m_h^*} \right\} - E_c \quad (8.א)$$

כאשר האיבר E_c הוא האיבר הקולומבי שאותו הזנחנו קודם וכעת הוא נוסף בתור תיקון מתוך תורת ההפרעות.

כאשר נסתכל על מעברים בין מצבי היסוד $1S_e 1S_h$ נקבל:

$$E_{(1S_e 1S_h)} = E_g + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2a^2} \left\{ \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right\} - \frac{1.8e^2}{\epsilon_e a} \quad (9.א)$$

האיבר האחרון נובע מפתרון בתורת ההפרעות.

כאשר בוחנים פליטת פוטון מנגנון חלקיק צריך לדעת מהם כללי הברירה של מעברי אנרגיה בתוך הגנו חלקיק. סיכוי המעבר האופטי פרופורציונלי לאיבר מומנט הדיפול:

$$P \propto \left| \langle \psi_e | e \cdot \vec{r} | \psi_h \rangle \right|^2 \propto \delta_{n_e n_h} \delta_{l_e l_h} \quad (10.א)$$

כך אנו מקבלים את כללי הברירה המתירים מעברים אופטיים רק בין אורביטלות דומות (איור 1.7 א)).

נספח ב - הליך הכנת טרנזיסטור HEMT

את גלאי ה HEMT הכנו בתהליך FL בחדר נקי עפ"י הסדר הבא :

הכנת מגעים :

1. ניקוי דגם : ניקוי הדגם מתבצע בעזרת אציטון ואיזופרופנול מורתחים בהם משרים את הדגם למשך 10 דקות תחילה באציטון ואז באיזופרופנול. ייבוש הדגם משאריות האיזופרופנול נעשה ע"י חנקן ופלטת חימום בטמפרטורה של 120 מעלות למשך 5-10 דקות.

2. יצירת תבנית של המגעים ברזיסט מסוג *Image reversal* בעזרת ספינר, פלטת חימום

ו *Mask allignment*.

3. הסרת שכבה חמצנית לפני נידוף : 20 שניות בתמיסה של 37% HCl ביחס של 1:1 עם מים.

4. נידוף מגעים על פי הטבלה (ב) הבאה :

סוג המתכת	עובי (nm)
ניקל	50
גרמניום	40
זהב	80
ניקל	15
זהב	150

טבלה (ב) – סדר ועובי נידוף
המתכות בטרנזיסטור

5. הסרת שאריות זהב על ידי שטיפת הדגם באציטון ואיזופרופנול.

6. חימום הדגם ל 300°C למשך כדקה, לשם דיפוזיה של המגעים לתוך המצע ליצירת מגע אוהמי.

הכנת MESA:

7. יצירת תבנית MESA ברזיסט חיובי בעזרת ספינר, פלטת חימום ו *Mask allignment*.

8. יצירת תעלה בעומק של מיקרון סביב MESA בעזרת טבילה למשך דקה בתמיסת פיראנה , $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{SO}_4$ ביחס 40:8:1.

נספח ג - ספיחה על גבי סילקון

ניקוי הדגם : ההליך זה הוא כמו הליך הניקוי בספיחה על מצע GaAs, מלבד הניקוי בHF אמוניום הידרוקסיד.

ספיחת השכבה האורגנית: את הדגמים נקיים אנו מכניסים לתמיסה האורגנית המורכבת מ *Merapto propylsilane (MPS)* המומס ב bicyclohexyl (BCH) ביחס של $1.5\mu l : 1ml$ בהתאמה למשך 90 דקות. מוציאים את הדגם לסוניקציה בטולאן למשך 30 שניות להורדת שאריות אורגניות לא ספוחות ומחזירים לתמיסה האורגנית ל-60 דקות נוספות שבסופן שוב שוטפים את הדגם בסוניקציה.

ספיחת הננו חלקיקים: ספיחת הננו חלקיקים על מצע סילקון זהה לחלוטין לספיחה על מצע *GaAs*.

ביבליוגרפיה

- 1 E. Borovitskaya and M. Shur, *Quantum dots*. (World Scientific, River Edge, N.J., 2002.).
- 2 V. I. Klimov, *Nanocrystal quantum dots*, 2nd ed. (CRC Press, Boca Raton, 2010).
- 3 S. Lindsay, *Introduction to nanoscience*. (Oxford University Press, Oxford ; New York, 2010).
- 4 A. P. Alivisatos, J Phys Chem-Us **100** (31), 13226-13239 (1996).
- 5 W. Seifert, N. Carlsson, M. Miller, M. E. Pistol, L. Samuelson and L. R. Wallenberg, Prog Cryst Growth Ch **33** (4), 423-471 (1996).
- 6 V. Aroutiounian, S. Petrosyan, A. Khachatryan and K. Touryan, J Appl Phys **89** (4), 2268-2271 (2001).
- 7 D. P. Kumah, S. Shusterman, Y. Paltiel, Y. Yacoby and R. Clarke, Nat Nanotechnol **4** (12), 835-838 (2009).
- 8 V. Mantovani, S. Sanguinetti, M. Guzzi, E. Grilli, M. Gurioli, K. Watanabe and N. Koguchi, J Appl Phys **96** (8), 4416-4420 (2004).
- 9 M. Grundmann, F. Heinrichsdorff, C. Ribbat, M. H. Mao and D. Bimberg, Appl Phys B-Lasers O **69** (5-6), 413-416 (1999).
- 10 T. Ando, A. B. Fowler and F. Stern, Rev Mod Phys **54** (2), 437-672 (1982).
- 11 V. Umansky, R. dePicciotto and M. Heiblum, Appl Phys Lett **71** (5), 683-685 (1997).
- 12 T. Aqua, R. Naaman, A. Aharoni, U. Banin and Y. Paltiel, Appl Phys Lett **92** (22) (2008).
- 13 W. C. Dunlap, *An Introduction to Semiconductors*. (1957).
- 14 Madelung, *Physics of III-V Compounds*. (Wiley, New York 1964).
- 15 J. L. Moll, *Physics of Semiconductors*. (New York 1964).
- 16 T. S. Moss, *Handbook on Semiconductors*. (North-Holland, Amsterdam, 1980).
- 17 R. A. Smith, *Semiconductors*, 2nd Ed ed. (Cambridge University Press, London, 1979).
- 18 K. W. Boer, *Survey of Semiconductor Physics*. (Van Nostrand Reinhold, New York, 1990).
- 19 K. Seeger, (Springer-Verlag, Berlin, 1999).
- 20 S. Wang, *Fundamentals of Semiconductor Theory and Device Physics*. (Prentice-Hall Englewood Cliffs ,New Jersey, 1989).
- 21 R. Williams, *Modern GaAs processing methods*. (1990).
- 22 D. A. Neamen, *Semiconductor Physics And Devices Basic Principles* 3ed. (McGraw-Hill, New Mexico, 2003).
- 23 G. E. F. R. N. Hall, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson Phys. Rev. Lett **9**, 366–368 (1962).
- 24 A. R. Reinberg, L. A. Riseberg, R. M. Brown, R. W. Wacker and W. C. Holton, Appl Phys Lett **19** (1), 11-& (1971).
- 25 V. M. Goldschmidt. (Faraday Soc, 1929).
- 26 H. Welker, Naturforsch **7**, 744 (1952).
- 27 J. C. I. S.M. Sze, Solid State Electron **11** (6), 599–602 (1968).
- 28 C. D. Thurmond, J Electrochem Soc **122** (8), 1133-1141 (1975).
- 29 M. Suezawa, A. Kasuya, Y. Nishina and K. Sumino, J Appl Phys **76** (2), 1164-1168 (1994).

- 30 E. W. W. a. H. B. Bebb, *Semiconductors and Semimetals* (New York, 1972).
- 31 M. Suezawa, A. Kasuya, Y. Nishina and K. Sumino, J Appl Phys **69** (3), 1618-1624 (1991).
- 32 S. C. Jain, J. M. McGregor and D. J. Roulston, J Appl Phys **68** (7), 3747-3749 (1990).
- 33 J. L. P.J. Dean, **1**, 398 (1970).
- 34 R .A. Cooke, R. A. Hoult, R. F. Kirkman and R. A. Stradling, J Phys D Appl Phys **11** (6), 945-953 (1978).
- 35 D. J. Ashen, P. J. Dean, D. T. J. Hurle, J. B. Mullin and A. M. White, J Phys Chem Solids **36** (10), 1041-1053 (1975).
- 36 J. Sagiv, J Am Chem Soc **102**.(1980) 92-98 ,(1)
- 37 X. Y. Sun, P. G. He, S. H. Liu, J. N. Ye and Y. Z. Fang, Talanta **47** (2), 487-495 (1998).
- 38 C. D. Bain and G. M. Whitesides, Science **240** (4848), 62-63 (1988).
- 39 T. Aqua, H. Cohen, A. Vilan and R. Naaman, J Phys Chem C **111** (44), 16.(2007) 313-16318
- 40 R. K. Iler, *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica*. (1979).
- 41 Y. Paltiel, A. Aharoni, U. Banin, O. Neuman and R. Naaman, Appl Phys Lett **89** (3) (2006).
- 42 N. W .A. N. Mermin, *solid-state physics*
- 43 O. L. J. Nozik *Colloidal quantum dots of 3-5 Semiconductor*. (MRS bulletin 1998).
- 44 A. P. Alivisatos, Science **271** (5251), 933-937 (1996).
- 45 L. E. Brus, J Chem Phys **80** (9), 4403-4409 (1984).
- 46 W. U, *Semiconductor quantum dots* (springer tracts in modern physics).
- 47 U. Banin, C. J. Lee, A. A. Guzelian, A. V. Kadavanich, A. P. Alivisatos, W. Jaskolski, G. W. Bryant, A. L. Efros and M. Rosen, J Chem Phys **109** (6), 2306-2309 (1998).
- 48 U. Banin, J. C. Lee, A. A .Guzelian, A. V. Kadavanich and A. P. Alivisatos, Superlattice Microst **22** (4), 559-567 (1997).
- 49 D. C. Oertel, M. G. Bawendi, A. C. Arango and V. Bulovic, Appl Phys Lett **87** (21) (2005).
- 50 Y. Paltiel, A. Sher, A. Raizman, D. Majer, A. Arbel, A. Feingold ,J. Levy and R. Naaman, Ieee Sens J **6** (5), 1195-1199 (2006).
- 51 H. Seiler, J Appl Phys **54** (11), R1-R18 (1983).
- 52 B. G. Yacobi and D. B. Holt, J Appl Phys **59** (4), R1-R24 (1986).
- 53 K. Endo, S. Matsumoto, H. Kawano, I. Sakuma and T. Kamejima, Appl Phys Lett **40** (11), 921-923 (1982).
- 54 L. F. Zagonel, S. Mazzucco, M. Tence, K. March, R. Bernard, B. Laslier, G. Jacopin, M. Tchernycheva, L. Rigutti, F. H. Julien, R. Songmuang and M. Kociak, Nano Lett **11** (2), 568-573 (2011).
- 55 N. W. Wang, Y. H. Yang and G. W. Yang, Appl Phys Lett **97** (4) (2010).
- 56 J. RodriguezViejo, K. F. Jensen, H. Mattoussi, J. Michel, B. O. Dabbousi and M. G. Bawendi, Appl Phys Lett **70** (16), 2132-2134 (1997).
- 57 N. C. Greenham, X. G. Peng and A. P. Alivisatos, Phys Rev B **54** (24), 17628-17637 (1996).
- 58 X. S. J. Zheng, Y. Zhanga, Y. Lia, X. Li, Yikang Pu, Journal of Solid State Chemistry **180**, 276 (2007).
- 59 M. Alonso, R. Cimino and K. Horn, Phys Rev Lett **64** (16), 1947-1950 (1990).

- 60 D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A .C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, Phys Rev Lett **53** (22), 2173-2176 (1984).
- 61 E. Kapetanakis, P. Normand, D. Tsoukalas and K. Beltsios, Appl Phys Lett **80** (15), 2794-2796 (2002).
- 62 C. H. Cho, B. H. Kim and S. J. Park, Appl Phys Lett. (1) 89 (2006).
- 63 B. Alperson, S. Cohen, I. Rubinstein and G. Hodes, Phys Rev B **52** (24), 17017-17020 (1995).
- 64 B. Alperson, I. Rubinstein, G. Hodes, D. Porath and O. Millo, Appl Phys Lett **75** (12), 1751-1753 (1999).

Abstract

Nano-structures are likely to become primary components of future electronic devices. Self assembled hybrid organic nano crystal (NC) devices are a route to achieve this goal. One central issue in using molecules in such devices deals with applying measurement methods which locally probe the molecular device.

In this work we investigated hybrid molecular semiconductor dot devices using cathode luminescence (CL) measurements finding narrow peak at proper conditions. The narrow resonant like peak was found to be sensitive to substrate impurity states, to the nano particle sizes and to the organic molecule linkers. A simple model that ascribes the CL peak to resonant charge transfer from the charged NCs to the deep impurity states of the substrate is suggested. According to the model the CL measurement properties opens a way to map the charge transfer in the hybrid device.

The ability to control hybrid organic-nanocrystal devices depends on charge transfer between NCs to the substrate through organic monolayer. In this research we developed a sensing device that its activate gate is based on light for a field effect transistor. This sensor use self-assembled organic monolayer as linkers that attach NCs to the surface of FET device, instead of the gate that exists in *GaAs/AlGaAs* common transistors. When the NCs absorb light, at a frequency corresponding to their resonance, a change in the electrochemical potential takes place. This change yields a variation in the electrostatic potential between the NCs layer and the semiconductor transistor channel underneath, thereby acting as a light controlled gate. We examine the response of the device under changing its parameters such as binding molecules, size, shape and composition of the NCs.

The Hebrew University of Jerusalem
The Faculty of Mathematics and Sciences
Department of Applied Physics

**Study of energy and charge transfer
in hybrid multilayer nano device**

Avner neubauer

Under the Supervision of: Dr. Yossi Paltiel

Thesis submitted for the degree Master of Science

April 2012