

## פיסיקה מזוסקופית

מרצ'י הייבלוס, המחלקה לפיסיקה תת-מיקרונית, מכון ויצמן למדע

(mesoscopic physics), הוא תחום הפיסיקה של עולם האלקטרוניקה התת-מיקרונית, מנסה לענות על שאלה זו. העניין הרב בפיסיקה המזוסקופית, בעשור האחרון של המאה העשרים, נובע מכך שישנם סימנים ברורים שהפיסיקה השולטת על התנהגות רכיבים אלקטרוניים הקטנים ממידה קריטית מסויימת; שונה מזו השולטת ברכיבים גדולים, ולכן השינויים בתפעול הם מהותיים ולא רק כמותיים. מהי הסיבה להבדלים איכותיים אלה?

הסיבה נעוצה בהתנהגות המיקרוסקופית של האלקטרונים, הנשמעת לתורת הקוואנטים, שעיקרה פותחו בראשית המאה העשרים. לפי תורה זו, האלקטרונים המרכיבים את האטומים (מלבד הפרוטונים והנויטרונים), ומעבירים את הזרם החשמלי במרבית המוצקים, במובנים רבים אינם חלקיקים קטנים הנושאים מטען חשמלי, אלא גלי חומר ומטען חשמלי הפרוסים במרחב ונעים במהירות גבוהה ביותר (כ-100,000 קמ"ש).

התדירות ואורך הגל המרחבי של הגל האלקטרוני תלויים באנרגיית האלקטרון. כאשר האלקטרון נע במוצק גבישי הוא מתפזר מזיהומים, פגמים מקריים ותנודות תרמיות שקיימים בכל חומר, אף כי כמותם קטנה ביותר; כתוצאה מכך הוא משנה את מסלולו ו/או מאבד אנרגיה בכל התנגשות. לכן, הגל האלקטרוני יוצא מכל התנגשות עם תדר, אורך גל ומופע (פאזה) השונים מזה שהיו לו לפני ההתנגשות. כתוצאה מכך מסתבר, שכאשר מספר ההתנגשויות בחומר גדול, ניתן לתאר את האלקטרון כחלקיק צפיד טעון, הנע בחומר ומתנגש, ותכונתו הגלית לא באה לידי ביטוי. אולם כאשר ההתקנים קטנים, עשויים האלקטרונים לעבור מקצה אחד של דגם החומר לשני עם מספר התנגשויות קטן או ללא התנגשויות בכלל, ואז נשמר אופיים הגלי ובא לידי ביטוי. אלקטרונים הנעים בחומר ללא התנגשויות נקראים "אלקטרונים בליסטיים". הגודל הקריטי של ההתקנים בו מתרחש המעבר מהתנהגות קלאסית חלקיקית להתנהגות קוואנטית גלית תואם ל"דרך החופשית הממוצעת בין ההתנגשויות" (ראה איור 1).

ההתקדמות המהירה בעולם האלקטרוניקה דוחפת למיזעורם של רכיבי המיקרואלקטרוניקה; אותם רכיבים פעילים שמגבירים אותות קטנים ומשמשים כמתגים אלקטרוניים במחשבים. סיבות המיזעור הן שתיים:

1. **כמות הרכיבים** - ככל שהרכיבים קטנים יותר תגדל צפיפותם, ומחשבים קטנים (כמחשבי מחברת "notebook") יוכלו להכיל כמויות מידע גדולות יותר בנפחים קטנים.

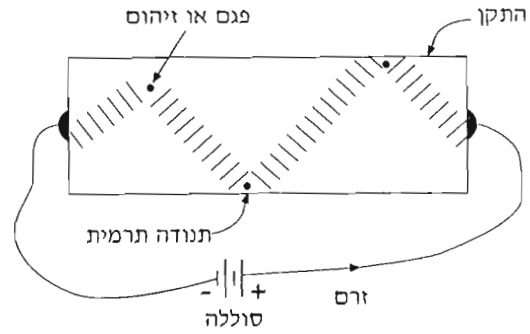
2. **מהירות הפעולה** - ככל שקטנים הרכיבים, זמן תנועת הזרם מכניסותו לתוך הרכיב האלקטרוני ליציאתו ממנו הוא קטן יותר ולכן תגובת הרכיב מהירה יותר.

כיום רכיבי המיקרואלקטרוניקה הנמכרים הם בגודל נומינאלי של מיקרון אחד (אלפית המילימטר), ואלה שנמצאים בשלבים מתקדמים של פיתוח הם בגודל של 0.5 מיקרון. אם קצב הפיתוח העתידי יהיה דומה לקצב הנוכחי אנו צפויים להגיע בסוף המאה העשרים להתקנים אלקטרוניים בגודל של 0.1 מיקרון. מיזעור זה יאפשר בניית מעגלים אלקטרוניים עם מאות מיליוני רכיבים בשטח של סמ"ר, ומהירויות עבודה הגדולות לפחות פי עשרה ממהירות העבודה הנוכחית.

מדוע יש צורך במהירויות עבודה כה גדולות? במחשבים, אף כי מהירות כל פעולת חישוב היא גדולה ביותר (אחד חלקי מיליארד השניה), מספר החישובים הנדרשים במחקרים מדעיים, בעיבוד נתונים רבים, או במעקב אחרי מערכות בעלות משתנים רבים (כמו בחיזוי מזג האוויר), הוא כה רב עד כי זמן החישוב הכולל יכול להיות כה ארוך שימנע באופן ריאלי חישובים אלה. בתחום התקשורת, מהירות עבודה גבוהה מאפשרת עבודה בתדירויות שידור וקליטה גבוהות (הרבה יותר גבוהות משידורי הרדיו והטלוויזיה המקובלים), וכתוצאה מכך מתאפשרת העברת ערוצי תקשורת רבים בו-זמנית.

נשאלת השאלה, האם מיזעור רכיבי המיקרואלקטרוניקה יגדיל את מהירות הפעולה אך לא יפגע בעקרונות הפעולה הידועים? תחום מחקר חדש, **פיסיקה מזוסקופית**

לחוק אום? **חוק אום** הוא החוק הבסיסי התקף במעגלים והתקנים חשמלים מקובלים, והמגדיר את היחס בין המתח (V) בין קצות ההתקן לזרם (I) בו,  $R = V/I$ . הגודל R הוא גודל קבוע הנקרא "**ההתנהגות החשמלית**" של הרכיב. קבוע זה תלוי לינארית באורך ההתקן ותלוי הפוך בשטח החתך שלו. אולם, כאשר ממדי ההתקן משתווים או קטנים מהדרך החופשית הממוצעת, ותופעות ההתאבכות משפיעות, חוק בסיסי זה אינו מתקיים. יתרה מזאת, **בהתקנים בליסטיים טהורים** (הקטנים בהרבה מהדרך החופשית הממוצעת), **ההתנגדות R של ההתקן אינה תלויה באורך ההתקן**, דהיינו התקן באורך עשירית מיקרון הוא בעל התנגדות הזוהה לזו של התקן באורך מיקרון (בהנחה שהדרך החופשית הממוצעת גדולה ממיקרון). זה אנלוגי לאלומת קרני אור מקבילות העוברות ללא התנגשויות בין חלקיקי אבק וללא בליעה באדי מים מרחקים קצרים כארוכים. באופן בלתי צפוי הגדלת שטח החתך של ההתקן לא תקטין את התנגדותו באופן מונוטוני, אלא בקפיצות התואמות למספר השלם של חצי הגל שיידחסו לחתך ההתקן (ראה איור 2). ה"**ההתנגדות הבליסטית** הנמדדת היא  $R_q/n$ , כאשר n הוא מספר חצאי הגל בחתך ההתקן. ו- $R_q$  היא **ההתנגדות הקוואנטית** (12,906 אוהם).

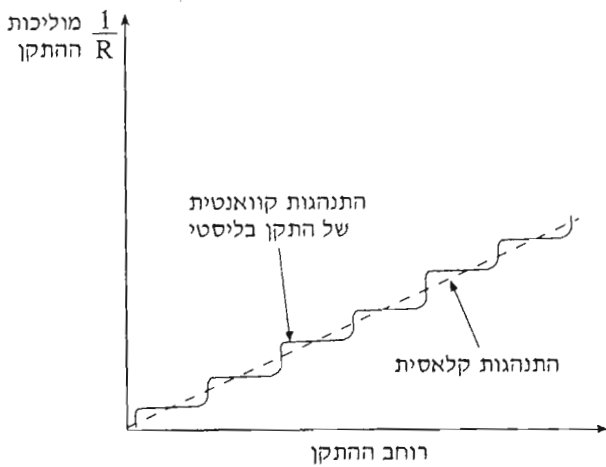


תרשים 1: אלקטרונים נעים כגלים בין התנגשויות בהתקנים גדולים. עם כל התנגשות כיוונו, מהירותם, האנרגיה שלהם ואורך הגל שלהם משתנים. ההתנהגות הממוצעת של ההתקן היא התנהגות קלאסית חלקיקית. מרחק אופייני בין צמד התנגשויות מכונה "**הדרך החופשית הממוצעת**".

כאן המקום לעמוד על ההבדל העיקרי בין התנהגות גלית-התאבכות לבין התנהגות חלקיקית-הסתכמות. שני גלים בתדירות זהה ובמופע זהה (רכב מול רכס, שפל מול שפל) מחזקים (-) האמפליטודות שלהם מתחברות) זה את זה, ואותם שני גלים במופע הפוך (רכב מול שפל, ושפל מול רכס) מבטלים זה את זה ונעלמים. לעומתם, שני חלקיקים תמיד מסתכמים. לכן, אלקטרון שאינו מתנגש ואינו מאבד אנרגיה, שומר על אופיו הגלי ועובר, למשל, עקיפה בעברו חריר קטן, או שבירה בעברו מתווך צפוף לדליל, בדומה לגלי אור ולפי כללים הדומים לכללי האופטיקה.

תוצאה מיידית של ההתנהגות הגלית של האלקטרונים היא **תופעת ההתאבכות**. היא דומה בתוצאותיה לתופעת "הגלים העומדים" באמבט מים קטן שאבן מושלכת למרכזו, או בחבל הקשור בקצהו האחד ומטולטל בקצהו השני. גלים המתקדמים ממקור מעורר מגיעים לשפה, מוחזרים, ומתאבכים עם הגלים המתקדמים. כאשר התווך הוא באורך של מספר שלם של חצאי אורך גל, נוצרים **גלים עומדים**, דהיינו, ישנן נקודות בתווך שאינן נעות כלל (צמתים). בדומה לזה, אלקטרון הנמצא בתוך התקן קטן, חש בגבולות ההתקן, נרתע מהם ומתאבך עם עצמו, ובצורה כזו שרק מספר שלם של חצאי אורך גל של האלקטרון יתאים בתוך גבולות ההתקן. המסקנה היא **שהאלקטרונים חייבים להתאים לעצמם אורכי גל מסויימים בהתאם לגודל ההתקן**, ולכן המהירות והאנרגיה של האלקטרונים בהתקנים קטנים הם גדלים בדידים (לזה קוראים "**רמות קוואנטיות**").

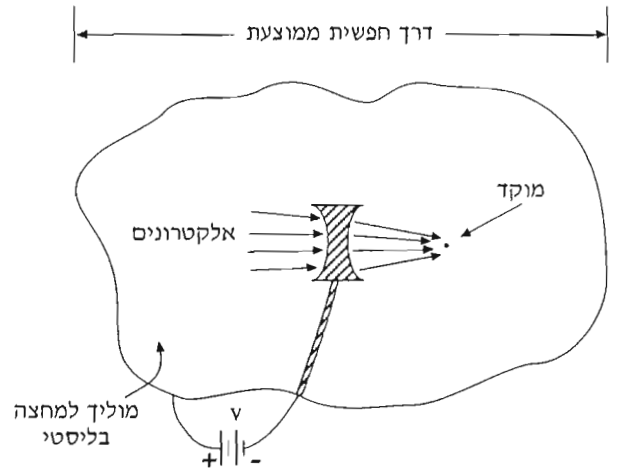
נשאלת השאלה: כיצד תשפיע התנהגות גלית זו על פעולת התקני המיקרואלקטרוניקה העתידיים? ראשית, מה יקרה



תרשים 2: מוליכות קוואנטית של התקן בליסטי כפונקציה של רוחבו בהשוואה להתנהגות קלאסית של אותו התקן.

בתחום בליסטי זה, ניתן לבצע "מניפולציות אופטיות" על האלקטרונים כמו החזרה (ע"י מראה), כיפוף (ע"י מנסרה), ומיקוד (ע"י עדשה). במקום רכיבים אופטיים פסיים קבועים, משתמשים בשדות חשמליים שניתן לשנותם במהירות ע"י אלקטרודות תת-מיקרוניות (ראה איור 3).

השגת שליטה דינמית במסלול התנועה של האלקטרונים בחומר עשוי לאפשר פעילויות אלקטרוניות חדשות.



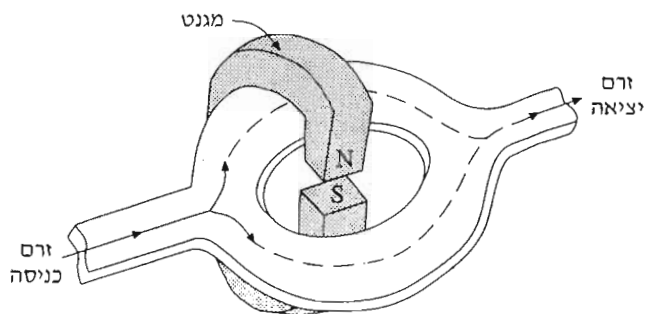
תרשים 3: מיקוד על-ידי הפעלת פוטנציאל על אלקטרודה מתכתית על פני מוליך למחצה. צורך האלקטרודה קובעת את צורת הפוטנציאל המושרה מתחת לה, ולכן את צורת העדשה האלקטרוסטטית. צורת עדשה קעורה, המפזרת קרני אור, ממקדת אלקטרונים בליסטיים. מרחק המוקד תלוי במתח  $V$  של האלקטרודה.

אם ההתקנים גדולים במעט מהדרך החופשית הממוצעת בין ההתנגשויות, אזי, קרוב לוודאי שההתקנים מכילים מספר קטן של פגמים או זיהומים הגורמים לפיזור האלקטרונים. להבדיל מהתקן גדול, המכיל בדרך כלל מספר רב ביותר של פגמים, בהתקן זעיר, קיום הפגמים עלול, באופן מפתיע, לעורר בעיות. בהתקנים גדולים מספר הפגמים הוא כה רב שמיועם הסטטיסטי מביא לאחידות כל ההתקנים. מיצוע זה אינו תקף בהתקנים קטנים, ולכן, התקנים הזחים לכאורה, אך עם מספר פגמים שונה במעט או עם פגמים הממוקמים באופן שונה בחומר, יתנהגו באופן שונה זה מזה (למשל התנגדותם תהיה שונה).

כאן המקום לציין שלא כל ההתנגשויות הן בעלות אותו אופי. התנגשויות עם פגמים או זיהומים (הכבדים הרבה יותר מהאלקטרונים) נקראות "התנגשויות אלסטיות" (משמרות אנרגיה); הן גורמות לשינוי כיוון אך אינן מוחקות את הזיכרון הקוואנטי של האלקטרונים, דהיינו המופע של הגל האלקטרוני ידוע בכל רגע. לכן, תופעות ההתאבכות מתקיימות בהתקנים הגדולים "מרחק האלסטי" בין התנגשויות. ה"מרחק האינאלסטי" הוא המהלך החופשי בין התנגשויות, בו גדולים סיכוייו של האלקטרון לאבד אנרגיה ובדרך כלל גם את הזיכרון הקוואנטי שלו. מרחק זה נקבע

בדרך כלל על-ידי התנגשויות עם אלקטרונים אחרים, או על ידי פיזורים מתנודות תרמיות של הגביש, והוא עשוי להיות (בטמפרטורות הקרובות לאפס המוחלט) הרבה יותר ארוך מהמרחק האלסטי. התקנים בסדר גדול של המרחק האינאלסטי או קטנים ממנו נקראים **התקנים מזוסקופים**, שהם התקנים לא קטנים מידי אך גם לא גדולים מידי. דהיינו, הזיכרון הקוואנטי של האלקטרונים נשמר בתוכם. בהתקנים אלה יכול אלקטרון לנוע, אף כי החומר אינו נקי, באופן מפוזר, או דיפוזיבי, ועדיין להתאבך עם עצמו וליצור גלים אלקטרוניים עומדים ורמות אנרגיה בדידות.

דוגמא אופיינית להתנהגות מזוסקופית היא **חיבור שני מוליכים (או נגדים) מזוסקופים במקביל**. ההתנהגות הקלאסית המוכרת היא במקרה זה, שהמוליכות הכוללת היא סכום המוליכויות של כל מוליך, זאת אומרת שההתנגדות הכוללת נמוכה מהתנהגות כל אחד מהנגדים. אולם, בעולם המזוסקופי, המוליכות הכוללת לא תהיה סכום המוליכויות: תופעת ההתאבכות תקבע את המוליכות הכוללת. יתרה מזו, היות שהמופע של גלי האלקטרונים מושפע גם על-ידי השדות המגנטיים אותם הם מקיפים, אם שני המוליכים המחוברים במקביל יכילו ביניהם שטף מגנטי (ראה איור 4), המופע היחסי בין האלקטרונים הנעים בשני המוליכים, ההתאבכות הנוצרת, וכתוצאה מזאת המוליכות הכוללת, יהיו כולם תלויים בשדה מגנטי זה (**אפקט "אהרונוב-בוהם"**), הסבר לאפקט זה בחוברת מופיע ב"תהודה" 14 חוברת 1 עמ' 3.



תרשים 4: שני מוליכים מזוסקופים המחוברים במקביל. המוליכות הכוללת אינה שווה לסכום המוליכויות שלהם. הכנסת שדה מגנטי במרכז הטבעת משנה את הפאזה היחסית הנצברת בשני האלקטרונים הנעים המוליכים ומשפיעה השפעה דרסטית על מוליכות הטבעת הכוללת.

מה קורה בממדים מאד קטנים, דהיינו בממדים הקרובים לאורך גל האלקטרון? אם המיזעור מתבצע באופן אסימטרי, למשל שונה בכיוונים שונים, כמו מיזעור במימד

מסתבר שכאשר לאלקטרונים יש אנרגיה מסויימת, ולכן אורך גל כזה המאפשר יצירת גלים עומדים ברווח בין שני המחסומים, האלקטרונים חודרים דרך שני המחסומים בהסתברות של 100%. מקור התופעה בהתאבכויות רבות המסתכמות ביניהן, ואין לה הסבר קלאסי. לכן, המוליכות החשמלית של ההתקן גבוהה במתח מסויים ("מתח התהודה"), ונמוכה במתחים הנמוכים או הגבוהים ממתח התהודה. דהיינו, **עליה** במתח מעל למתח התהודה גורמת ל**ירידה** בזרם ההתקן; תופעה מאד לא מקובלת (התנגדות דיפרנציאלית שלילית), הניתנת לניצול ביצירת תנודות חשמליות ממתח אספקה קבוע.

דוגמא נוספת ואחרונה של תופעה מזוסקופית היא **תופעת ה"מחסום הקולומבי"**. היות שהאלקטרונים נושאים מטען חשמלי (שלילי) זהה הם דוחים זה את זה, ולכן באזורים צרים, כניסתו של אפילו אלקטרון בודד נמנעת היות שהיא גורמת לצפיפות יתר. רק אם תינתן לאלקטרון אנרגיה מספיק גבוהה כדי שיוכל להתגבר על ה"מחסום הקולומבי" תותר כניסתו וזרם יוכל לזרום באזור הצר. המוליכות החשמלית מהווה אז מדד למספר האלקטרונים העוברים בהתקן הקטן; **כל אלקטרון העובר בהתקן, גורם לעליה במוליכות החשמלית**. תופעה זו יכול להביא ליצירת **"טרנסיסטור חד-אלקטרונים"** בעל מספר רב של מצבים (כמספר האלקטרונים שיכולים להצטרף בגוף הטרנסיסטור). הטרנסיסטורים המקובלים היום הם בעלי שני מצבים בלבד: מצב פתוח (מוליך) ומצב סגור (מבודד), ולכן המחשב של היום מסתמך על הספרות 1,0 לצורך חישוביו ולצורך אגירת מידע בזיכרון. הפעלת טרנסיסטורים בעלי מספר רב של מצבים, אם תסתבר כמעשית, תהווה אתגר למהנדסי התוכנה; ניצולה יכול להביא למהפכה בכל תחומי המיחשוב ועיבוד הנתונים.

עוד לא נאמר דבר על החומרים האלקטרוניים בהם משתמשת תעשיית המיקרואלקטרוניקה. חומרים אלה הנקראים **"מוליכים למחצה"**, אינם לא מוליכים (כמו מתכות), ולא מבודדים (כמו מרבית החומרים הקרמיים או הפלסטיים). חומרים אלה משנים את מוליכותם בהתאם למתח המופעל עליהם או על-ידי כמות זעומה ביותר של מאלחים (זיהומים) המוחדרים לתוכם ביוזעין. למשל, כמות זעומה של זיהום מתאים, כמו מיליונית ממספר האטומים ליחידת נפח, תגרום לחומר ולעבור ממצב של מבודד למצב של מוליך טוב מאד. החומר המוליך למחצה הנפוץ ביותר הוא ה**סיליקון (Si)**. חומר זה משמש לייצור מרבית הרכיבים האלקטרוניים בעולם. חסרונותיו העיקריים הם שאינו חומר

אחד כאשר שאר שני הממדים גדולים יחסית, מקבלים שכבות דקות מאד הנפרסות על שטח גדול יחסית הנקראות **"שכבות דו-ממדיות"**. או למשל מיזעור בשני ממדים והשארית הממד האחרון גדול מביא ליצירת קווים צרים מאד וארוכים, "קווים חד ממדיים"; או מיזעור בשלש הממדים מביא לקוביות מאד קטנות ("ממד אפס"). מיזעורים אלה מביאים להתנהגויות הדומות לאלה של עולמות דו-, חד-, ואפס ממדים, השונות לחלוטין מאלה המוכרות לנו בעולמנו התלת-ממדי. למשל, התנהגות אלקטרונים בקוביה "בעלת ממד אפס" מזכירה את התנהגות האלקטרונים באטום בודד (או מולקולה), אם כי הקוביה היא בעלת ממדי אורך הגל של האלקטרונים ומכילה אלפי אטומים אמיתיים.

דוגמא מאלפת נוספת המדגישה עד כמה יהיו שונים ההתקנים הקטנים מאבותיהם הגדולים מומחשת ב**תופעת המינהור ("tunnelling")**:

**קלאסית**, חלקיק מסוגל לעבור מכשול כל שהוא, אם כמות האנרגיה שלו מספיקת. למשל, כדי לעבור מעל קיר בגובה  $h$ , כמות האנרגיה המינימאלית שחלקיק צריך לצבור היא  $mgh$ , כאשר  $m$  היא מסת החלקיק ו- $g$  הוא התאוצה הגרביטציונית על פני כדור הארץ.

**קוואנטית**, אין זה נכון. החלקיק יכול לעבור את המשוכה, בהסתברות מסויימת, אם כי קטנה מאד, אפילו כאשר כמות האנרגיה שלו קטנה מ- $mgh$ . בעולמנו הגדול והמגושם הסתברות המעבר היא כה קטנה שמספר הניסויים שצריך לבצע כדי לחזות בתופעת מעבר לא קלאסי אחד הוא כה גדול עד כי אינו אפשרי מבחינה מעשית. בעולם המזוסקופי, לעומת זאת, מחסומי הפוטנציאל החשמליים הם בדרך כלל קטנים וצרים ביותר, ובנוסף לזה מסת האלקטרון אף היא קטנה מאד, ולכן, הסתברות המעבר גדולה יותר (אם כי עדיין בסדר גודל של מיליונית או אף פחות). קל וחומר, מספר האלקטרונים הוא כה גדול (בערך  $10^{18}$  לסמ"ק), שאפילו אם אחוז קטן ביותר יעבור את המחסום עדיין נוכל למדוד זרם חשמלי, וההתקן יהיה בעל מוליכות חשמלית ניכרת. למשל, אם נשתמש במספרים שצוינו למעלה  $10^{12} = 10^{-6} \times 10^{18}$ , דהיינו,  $10^{12}$  אלקטרונים יעברו את המחסום ביחידת זמן, אפילו אם הסתברות המעבר היא רק מיליונית, מספר זה הוא גדול ביותר ועוצמת הזרם יכולה להיות די ניכרת.

מדהימה אף מתופעת המינהור היא **תופעת המינהור התהודתי**. תופעה זו מתרחשת כאשר המחסום הבודד מוחלף בשני מחסומים עוקבים עם רווח קטן ביניהם.

מזוסקופיים חדישים. רוב שטחי המחקר של הפיסיקה המזוסקופית מנצלים באינטנסיביות חומרים מרוכבים אלה, אך תוצאות המחקר יהיו, קרוב לוודאי, ניתנים לניצול בכל החומרים האלקטרוניים.

הפיסיקה המזוסקופית היא דוגמא מאלפת כיצד התפתחות הטכנולוגיה בשלהי המאה העשרים דחפה לתחום מחקר חדש שראשית פירותיו מתגלים עתה. אין ספק שמחקר חדשני זה יוביל לקראת הבנה בסיסית יותר של הפיסיקה של המצב המוצק ויסלול דרך לקראת אלקטרוניקה מסוג חדש. התקנים המבוססים על אלקטרוניקה תת-מיקרונית יפעלו במהירויות גבוהות ביותר, בצפיפויות רכיבים מדהימות, ובעקרונות עבודה שונים לחלוטין.

אופטי (לא ניתן לייצר ממנו לייזרים), מהירות האלקטרונים בתוכו קטנה יחסית, וכתוצאה מכך הדרך החופשית הממוצעת קטנה אף היא. לכן, בהתקנים שגודלם הוא כמיקרון, קשה להשיג תנועת אלקטרונים בליסטית, ותופעות מזוסקופיות קשות להבחנה. חומר מוליך למחצה חדיש יותר, אך פחות ידוע ומקובל, הוא **הגליום-ארסניד** (GaAs). לחומר זה אין החסרונות שצוינו בסיליקון, והדרך החופשית הממוצעת של האלקטרונים בו יכולה אף להיות מספר ניכר של מיקרונים. בנוסף, שיטות שיקוע חומרים מתוחכמות מאפשרות יצירת שכבות דקות של גליום-ארסניד ובסמיכות לו שכבות דקות אחרות של תרכובותיו (עם אלומיניום או אינדיום), וזה מאפשר תכנון של התקנים