

אטומים מלאכותיים

ננו־גבישים של מוליכים למחצה

כתבה אביטל בר לפי ריאיון עם הכרופסורים אורי בנין ועודד מילוא מהאוניברסיטה העברית בירושלים על עבודתם בנושא: "חקר ננו־גבישים של מוליכים למחצה בשילוב ספקטרוסקופיה אופטית ומיקרוסקופ מנהור סורקי" (בתמיכת קרן ביכורה)

תכונה תלוית גודל

בשל תופעת התיחום הקוונטי (quantum confinement) התכונות האופטיות של החומר נעשות תלויות גודל: צבעו האופייני של האור שהננו־גביש בולע ופולט משתנה עם גודלו. תמיסה המכילה ננו־גבישים גדולים יחסית (בקוטר 6-7 ננומטרים) תפלוט אור אדום, וככל שהגבישים בתמיסה יהיו קטנים יותר כך ישתנה צבע הפליטה לגוון הכחול (2 ננומטרים). כך אפשר לייצר מאותו החומר גבישים הפולטים אור בצבעים רצויים.

תרשים 1

פליטת האור (פלורוסנציה) מתמיסות של ננו־גבישים של קדמיום סלניד. על ידי כיוונון הגודל אפשר לכסות את כל התחום הנראה מן הכחול (ננו־גבישים קטנים), לאדום (ננו־גבישים גדולים).



גבישים הקטנים פי מיליון מגרר סוכר

אפשר ליצור ננו־גבישים בשתי שיטות: מכיוון הגביש (Top-Down) - מייצרים מבנים ננומטריים באמצעים ליטוגרפיים ועיכול של הגביש הגדול. שיטה זו היא הבסיס לייצור מבנים תת־מיקרוניים בתעשיות המיקרואלקטרוניקה כיום. מכיוון המולקולה (Down-Up) - סינתזה כימית ובניית ננו־גבישים מן האטומים המרכיבים אותם. בשיטה זו, שמשתמשים בה במעבדתו של פרופ' בנין, אפשר לקבל דוגמאות הומוגניות של ננו־גבישים בתחום גדלים רחב, ובכללו באזור הגדלים הקטנים ביותר. ננו־גבישים אלו מצופים שכבה של מולקולות אורגניות שתפקידן למנוע את התחברות החלקיקים זה לזה, לאפשר את התמוססות הגבישים בממיסים, וכן לשמש שכבת הגנה (פסיבציה) לפני השטח. ציפוי אורגני זה מקנה יתרון ניכר לשיטת ההכנה הזאת. היא מאפשרת מניפולציות כימיות לשם התאמת הננו־גבישים לסביבה (למשל חיבורם למשטח, הכנת פילמים, שילובם בפולימרים ועוד).

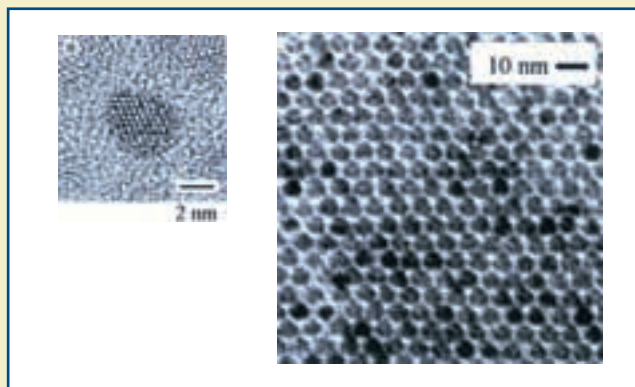
בשנים האחרונות מתפתחים תחומי המחקר החדשים - ננו־מדע וננו־טכנולוגיה. מדענים הצליחו לפתח ננו־גבישים זעירים ולשלוט בגודלם בסקלה ננומטרית, ועקב כך בתכונותיהם הכימיות, החשמליות, והאופטיות. ננו־גבישים אלו הם מערכת מודל חיונית לחקר ההתפתחות של תכונות החומרים מהרמה המולקולרית עד הרמה המקרוסקופית. עם ננו־חומרים אחרים יחד הם עתידים לשמש בסיס לפיתוח טכנולוגיה עילית בתחומי החומרים המתקדמים, הננו־אלקטרוניקה, האלקטרו־אופטיקה, הרפואה ועוד.

ננו־חומרים

ננו־מדע וננו־טכנולוגיה עוסקים ביצירת אובייקטים זעירים ביותר שמידותיהם 1-100 ננומטר ובחקר תכונותיהם (1 ננומטר הוא ביליונית המטר, כמיליונית ראש סיכה). בתחום הגדלים הננומטרי - תחום ביניים בין מולקולות למוצקים - תכונות החומר נעשות תלויות בגודלו.

בחיי היומיום ידוע שהתכונות המהותיות של פיסת חומר אינן תלויות בגודלו. למשל, המים בכוס קופאים באפס מעלות צלזיוס. גם המים באגם גדול קופאים בדיוק באותה טמפרטורה. יהלום הוא שקוף ותכונות העברת האור שלו אינן תלויות בגודלו. כאשר לוקחים גביש קטן של המוליך למחצה קדמיום־סלניום שגודלו כגרר סוכר וחותכים אותו לשניים - מקבלים שני גבישים שתכונותיהם המהותיות זהות בכל לגביש השלם. אמנם שניהם קטנים יותר מהגביש המקורי, אבל יש להם אותן תכונות מאפיינות: הם ניתכים באותה טמפרטורה, יש להם צבע זהה, הם מוליכים זרם וחום באותו האופן. גרר קדמיום סלניום הוא גרר קדמיום סלניום יהיה גודלו אשר יהיה.

אם מוסיפים לחלק את הגבשושן הקטן, אפשר להגיע לחלקיק קטן פי מיליון מגרר סוכר המכיל רק כמה אלפי אטומים של קדמיום וסלניום. בננו־גביש כזה התכונות של החומר משתנות ונעשות תלויות בגודלו. הכוונה לתכונות מאפיינות של החומר, כגון צבע, מוליכות חשמלית, מוליכות חום, טמפרטורת התכה ותכונות כימיות. לכן, בגדלים אלה אפשר לכוונון את תכונות החומר על ידי בחירה של גודל החלקיק.



בתמונה משמאל – ברזולוציה גבוהה – נראה הסידור המחזורי של האטומים בננו־גביש של אינדיום ארסניד שקוטרו כ־2 ננומטר. בתמונה מימין נראה מערך מסודר של ננו־גבישים. התמונה מדגימה בבירור את אחידות הגודל והצורה הכמעט כדורית של ננו־גבישים אלו. במערך כזה אפשר לראות בננו־גבישים אטומים מלאכותיים היוצרים על־גביש מלאכותי.

ננו־גבישים כאטומים מלאכותיים

האנולוגיה של ננו־גבישים אלו לאטומים מלאכותיים מתבטאת גם בתכונותיהם האופטיות והחשמליות. פיענוח תכונותיה הפיזיקליות של מערכת מורכבת כננו־גביש חייבה שילוב של שיטות מדידה מגוונות. החוקרים שילבו שיטות ספקטרוסקופיה אופטית ומיקרוסקופיית מנהור סורק. עצם השילוב היה חידוש חשוב בחקר ננו־גבישים, שקודם לכן נחקרו בשיטות אופטיות בלבד.

הספקטרוסקופיה האופטית מאפשרת לחקור את הבליעה והפליטה מננו־גבישים וממדידות אלה אפשר ללמוד על מבנה הרמות האלקטרוניות התלוי בגודל. שיטה אחרת שאפשרה לקבל מידע משלים חשוב היא השימוש במיקרוסקופ מנהור סורק (STM Scanning Tunneling Microscope) המספק מידע על צורת הננו־גביש ועל תכונותיו החשמליות.

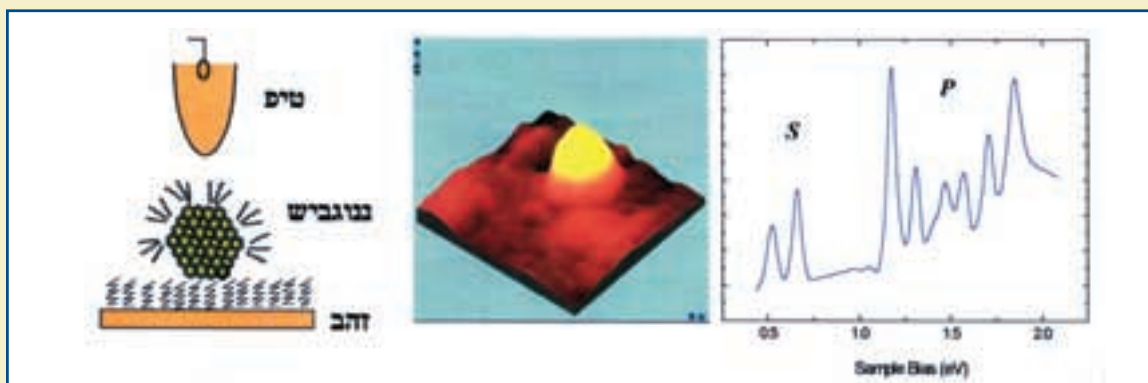
טכניקת STM פותחה בתחילת שנות השמונים והייתה הראשונה במשפחה של טכניקות מיקרוסקופיות חדשות המאפשרות חקר ננו־חומרים בכושר הפרדה אטומי. במכשיר זה האלקטרונים זורמים בתהליך קוונטי – מנהור – בין הדגם הנמדד ובין חוד STM המצוי במרחק של כננומטר מפני הגביש. זרם המנהור רגיש מאוד למרחק מפני הגביש ואפשר למדוד את הטופוגרפייה של פני השטח על ידי סריקת החוד.

במעבדתו של פרופ' מילוא השתמשו בפעם הראשונה במכשיר STM לצורך פיענוח מבנה הרמות האלקטרוני של ננו־גבישים של מוליכים למחצה על ידי מדידת זרם האלקטרונים העוברים דרכם. לביצוע מדידות אלו חוברו הננו־גבישים למשטח זהב מוליך חשמל בעזרת מולקולות מתאימות (תרשים 3).

תרשים 3

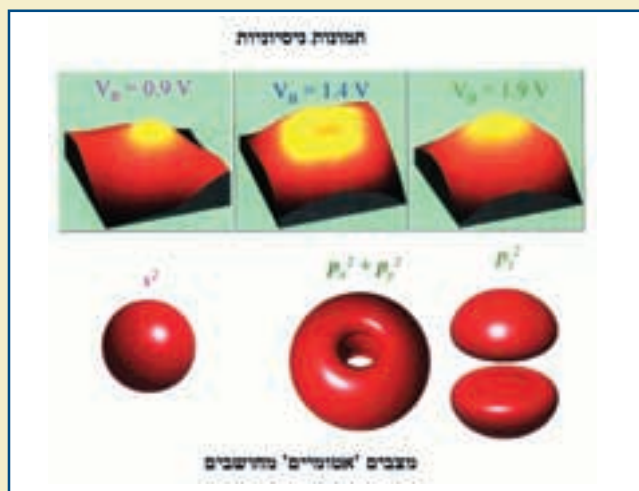
מדידות במיקרוסקופ מינהור סורק של ננו־גביש של אידיום ארסניד. משמאל תמונה סכמטית של הניסוי, במרכז ננו־גביש יחיד, מימין ספקטרום מנהור של ננו־גביש המראה התנהגות אנלוגית לאטום.

של הננו־גביש. ננו־גבישים אלו שולבו עם פולימרים מוליכים לצורך הכנתם של דיודות פולטות אור בתחום האינפרה־אדום.



תרשים 5

מיפוי המבנה המרחבי של הרמות האלקטרוניות בננו־גביש בעלות צורה האופיינית לפונקציות הגל באטומים



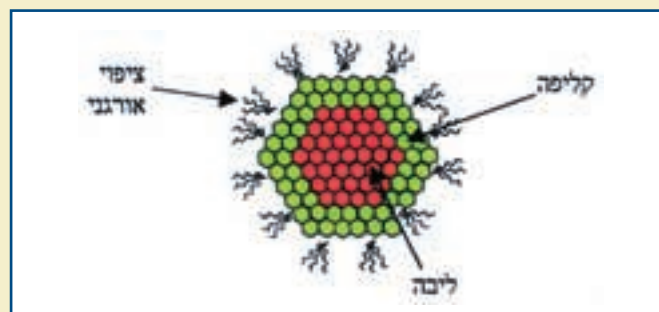
בתרשים רואים סדרה של פיקים. תחילה אפשר להבחין בזוג פיקים, ובאנרגיה גבוהה יותר – בסדרה של שישה פיקים. כל פיק מתאים למעבר של אלקטרון יחיד דרך רמה אלקטרונית של הננו־גביש. מבנה הפיקים מזכיר במידה רבה את מבנה הקליפות הידוע של אלקטרונים באטום, שהוא הבסיס לטבלה המחזורית של היסודות: בקליפה הראשונה יש מקום לשני אלקטרונים (כמו אטום הליום), ובזו שאחריה מקום לשישה אלקטרונים.

לתוצאות האלה יש השלכות טכנולוגיות מעניינות, שכן הן מלמדות על האפשרות להשתמש בננו־גבישים כאבני בניין לטרנזיסטורים חדשים זעירים ביותר המבוססים על מינהור של אלקטרונים יחידים דרכם.

האנלוגיה של ננו־גבישים לאטומים קיבלה עוד חיזוק ממדידות המבנה המרחבי (פונקציות הגל) של המצבים האלקטרוניים בננו־גבישים. המדידות נעשו על ננו־גבישים מסוג ליבה־קליפה (Core-Shell)

תרשים 4

מבנה סכמטי של חלקיק קליפה־ליבה



המדידות נעשו בכמה מתחים שכל אחד מהם מתאים לרמה אלקטרונית מסוימת. במתח נמוך – הרמה הראשונה האנלוגית לרמת היסוד באטום מימן המזוהה כרמה S וצורתה כדורית. במתח ביניים – צורה דמוית כעך המתאימה לרמת P. במתח הגבוה ביותר – צורה כדורית האופיינית לרמה P מלאה אטומים. מתחת למדידות הניסיוניות מוצגות תוצאות של חישוב מבנה הרמות המתאימות. ספקטרום הרמות התלוי בעובי הקליפה נחקר בעבודה זו בשיטה הייחודית שפיתחו בנין ומילוא של שילוב המדידות האופטיות עם מדידות המינהור.

בנין ומילוא מצאו בעבודתם אנלוגיה המדמה ננו־גבישים לאטומים מלאכותיים. ההשוואה בין תוצאות ספקטרום המנהור ובין הספקטרום האופטי אפשרה להם לזהות את מבנה הרמות האלקטרוניות בננו־גבישים.

הננו־גבישים שפותחו הם בעלי מבנה המכונה ליבה־קליפה. על ליבה של ננו־גביש מאינדיום ארסניד אפשר לגדל בתהליך מיוחד קליפה של חומר מוליך־למחצה אחר. שכבה זו מבודדת את הליבה הפולטת את האור מהסביבה, וכך מתקבל שיפור ניכר ביעילות הפלורסנציה