

ניסוי פרנק הרץ - מדידת אנרגיית ערעור ואנרגיית יינון של אטומי כספית ואישוש

דיסקרטיזציה של רמות האנרגיה

שם: נתיב מאור | ת"ז: 319002911 | דוא"ל: nativ.maor@campus.technion.ac.il

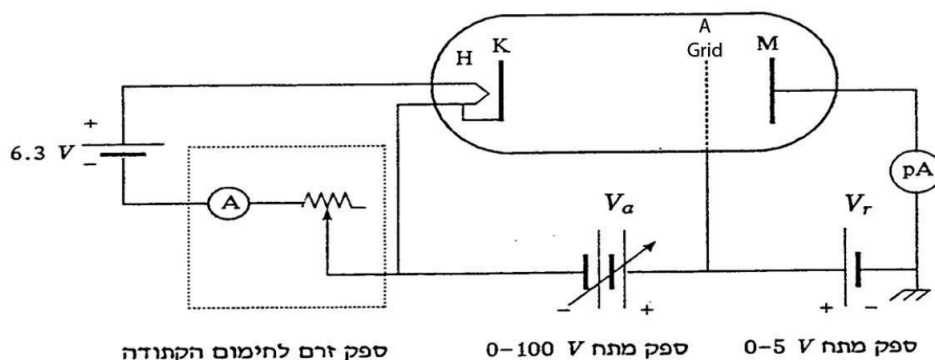
שם: דור חי שחם | ת"ז: 318258555 | דוא"ל: dor-hay.sha@campus.technion.ac.il

April 13, 2023

תקציר

ניסוי זה היה מורכב משני חלקים , חלק ראשון הוא מדידת הפרש האנרגיה בין רמת היסוד לרמה המעורערת הראשונה של אטום כספית וחלק שני הוא מדידת אנרגיית היינון. מטרתם המשותפת הייתה לאשש את ההשערה של מודל בוהר שרמות האנרגיה של אטומים הן בדידות ובדיקה האם ניתן לערער אטומים על ידי מסירת אנרגיה מהתנגשות עם אלקטרונים. בשני החלקים הואצו אלקטרונים לתוך שפופרת המכילה גז אטומי כספית ונמדד זרם היוצא מן השפופרת כתוצאה מכך. בחלק הראשון, נמדד זרם היוצא מהשפופרת כתלות במתח ההאצה של האלקטרונים, מהפרש מתחי האצה בין שני שיאים עוקבים של הזרם הוסקה אנרגיית הרמה המעוררת. בחלק זה הזרם הוא כתוצאה מאלקטרונים המגיעים אל הקתודה. בחלק השני, נמדד שוב זרם היוצא מהשפופרת כתלות במתח ההאצה, אך הפעם בקונפיגורציה שונה של מתחים על חלקי הרכיבים בשפופרת בצורה כזאת שנצפה שהזרם יהיה כתוצאה מתנועה של יונים של כספית שנוצרו לאחר יינון. ממדידות אלה הסקנו את המתח ההאצה שבו התחילה תופעת היינון וממתח ההאצה הזה הסקנו משימור אנרגיה את אנרגיית היינון של אטומי הכספית. לבסוף השווינו את הפרש האנרגיה בין הרמות הנמוכות ואנרגיית היינון שהתקבלו אל תוצאות המקובלות בספרות.

לפי מודל האטום של בוהר, אלקטרונים מקיפים אטומים במסלולים בדידים להם מותאמים רמות אנרגיה בדידות. אלקטרונים יכולים לעבור בין מסלולים על ידי קליטה או פליטה של מנות אנרגיה ספציפיות הנקבעות על ידי הפרשים בין הרמות. הפליטה של האנרגיה מהאטום מתבצעת על ידי פליטה של פוטון באורך גל מתאים. באופן דומה קליטה של אנרגיה על ידי האטום עלולה להתבצע על ידי קליטה של פוטון, אך עולה ההשערה האם ניתן למסור אנרגיה לאטום כך שיעבור מרמת אנרגיה אחת לאחרת על ידי התנגשות עם אלקטרונים. השערה זו יחד עם אישוש קיום רמות אנרגיה בדידות כמצופה מהמודל נחקרו בניסוי זה בשני חלקים. בחלק הראשון נמדד הפרש רמות האנרגיה בין רמת היסוד והרמה המעוררת הראשונה של אטום הכספית ובחלק השני נמדדה אנרגיית היינון - האנרגיה הדרושה לשחרור אלקטרון מהאטום. מערכת הניסוי מורכבת משופרת המכילה טיפות של כספית שעל ידי העלאת הטמפרטורה ניתן לשלוט בלחץ האדים שלהן. השופרת מכילה בקצה אחד קתודה K , בקצה השני אלקטרודה מאספת M וביניהן אנודה A בצורת סריג המאפשרת מעבר אלקטרונים ויונים דרכה. הקתודה K מחוממת על ידי גוף חימום H (המחובר לספק זרם חימום עם מתח חימום $V_H = 6.3V$) ולכן פולטת אלקטרונים. הקתודה K והאנודה A מחוברות שתיהן לספק מתח V_a - מתח ההאצה, כך שאלקטרונים הנפלטים מהקתודה מאיצים אל עבר האנודה. בחלק הראשון של הניסוי חוברה האלקטרודה M אל מד זרם פיקואמפרטר pA ונסגר מעגל על ידי ספק מתח ההאטה V_r בחיבור בין האמפרטר ל A . תרשים של המעגל של חלק זה מופיע באיור 1 מתהדריך הניסוי:



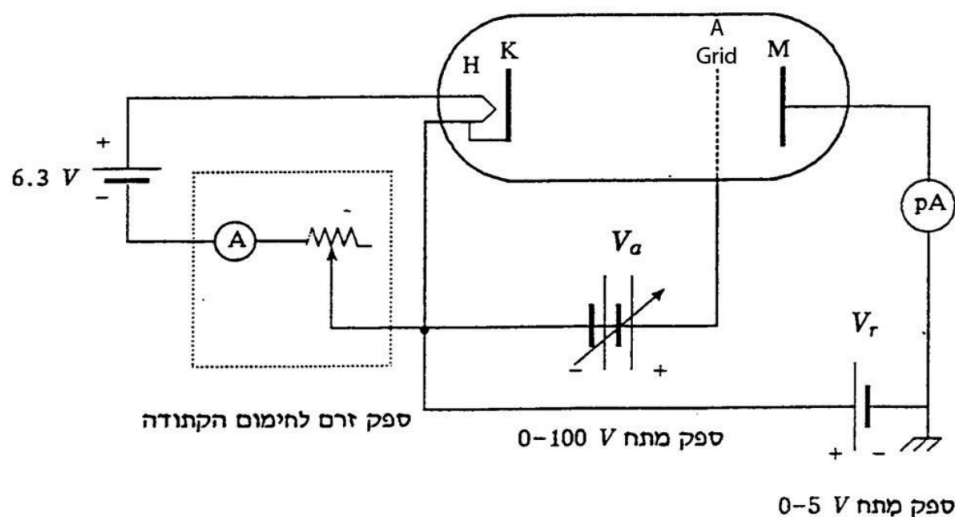
איור 1: חיבורי המעגל החשמלי עבור החלק הראשון של הניסוי (נלקח מציור 1 מהתהדריך)

בדרכם של האלקטרונים אל עבר האנודה הם מתנגשים עם אטומי הכספית. ככל שמתח ההאצה יותר גדול כך האנרגיה הקינטית של האלקטרונים גדלה. כאשר לאלקטרונים אנרגיה קינטית נמוכה, ההתנגשות עם האטומים הינה אלסטית, כיוון שאין להם די אנרגיה כדי לערער את האטום מרמת היסוד אל הרמה המעוררת הראשונה. כאשר האנרגיה הקינטית של האלקטרונים גדולה מספיק, בהתנגשות עם האטומים הם יעוררו וכתוצאה מכך יואטו לאחר ההתנגשות. במקרה הראשון לאלקטרונים אנרגיה גדולה לאחר ההתנגשות ולכן מספיקה כדי לעבור את מתח ההאטה ובכך מאפשרת יצירת זרם גבוה בהגעתם ל A בהשוואה למקרה השני שבו לאלקטרונים אנרגיה נמוכה לאחר ההתנגשות. נצפה עם כך לתבנית חוזרת ונשנית של עלייה וירידה של הזרם כתלות במתח ההאצה, כשבמתחי האצה המתאימים למעבר אנרגטי נראה נקודות מינימום מקומיות

של הזרם לאחר ירידה חדה. כך שהפרשי המתחים בין נקודות המינימום אמורים להוות אינדיקציה להפרש האנרגיה בל⁴ רמת היסוד לרמה המעוררת. משיקולי שימור אנרגיה, ניתן לקבל קשר בין האנרגיה הקינטית של אלקטרון למתח ההאצה:

$$(1) \quad eV_a = E_k + e(\varphi_A - \varphi_K)$$

(כאשר V_a הוא מתח ההאצה ב V , e מטען האלקטרון ב C , E_k אנרגיה קינטית של האלקטרונים ב eV ו φ_x פונקצית עבודה של המתכת של הרכיב $x \in \{A, K\}$ ב V). המתח המתאים למקסימום המקומי הבולט הראשון הוא המתח שבו האנרגיה הקינטית של האלקטרון שווה לרמת האנרגיה המעוררת של האטום ומכך ניתן להסיק את מתח המגע $\varphi_A - \varphi_K$ מנוסחא 1. הרמה אליה האלקטרונים מעוררים את האטום תלויה בתנאי הניסוי, ככל שלחץ האדים גדול יותר מתרחשות יותר התנגשויות וכך אנרגיית האלקטרונים יורדת (כיוון שההתנגשויות גורמות להאטת האלקטרונים), עבור לחץ נמוך מספיק האנרגיה תהיה גדולה ועלולה לגרום גם ליינון. בחלק הראשון של הניסוי חיפשנו את אנרגיית הערור אל הרמה הראשונה. בחלק השני, בו האנרגיה של הערור היא אנרגיית היינון, שונה המעגל בצורה כזו שרק היונים יגיעו אל M והם אלה שיגרמו לזרם בפיקומפרמטר pA . זאת על ידי יצירת הפרש מתחים חיובי בעזרת מתח ההאטה V_r בין K ו M שלא יאפשר לאלקטרונים היוצאים מ K להגיע ל M , כפי שמתואר בתרשים:



איור 2: חיבורי המעגל החשמלי עבור החלק השני של הניסוי (נלקח מציור 4 מהתדריך)

בחלק זה, מתח ההאצה שבו מתחיל זרם היונים הוא המתח שניתן לגזור ממנו את אנרגיית היינון לפי נוסחא 1, שכן אנרגיית היינון במקרה זה היא E_k .

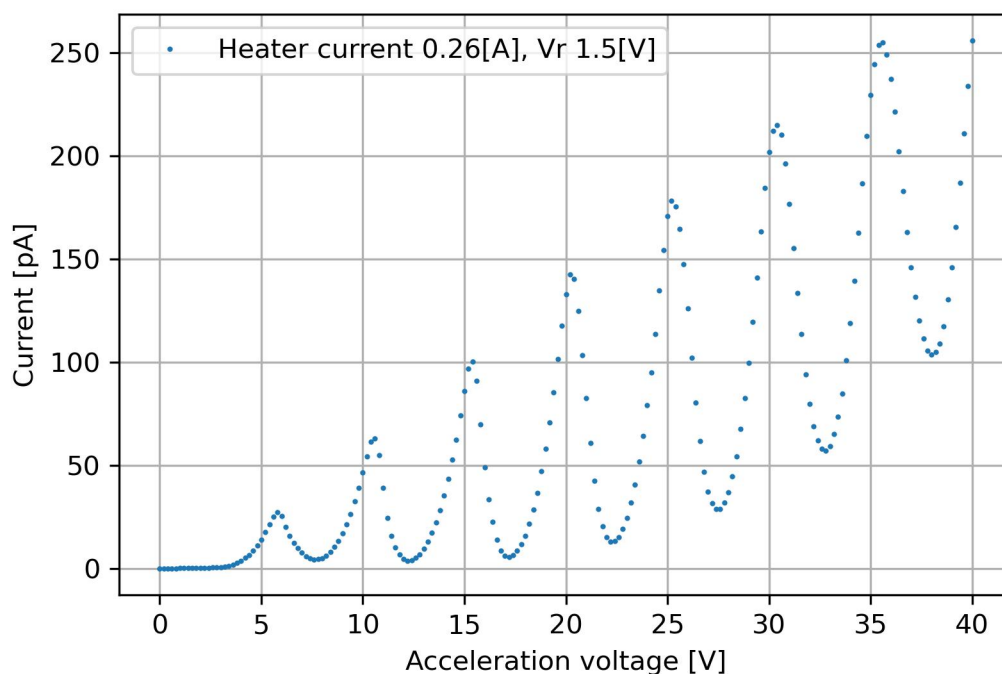
תוצאות הניסוי

מדידת אנרגיית הערעור הראשונה של כספית ואימות הדיסקרטיזציה של רמות האנרגיה:

חיברנו את המעגל החשמלי בהתאם לאיור 1, כילנו את ווסת התנור להגבלת הטמפ' לעד 200 מעלות צלזיוס וחיממנו את התנור ל- $170^{\circ} \pm 0.1^{\circ}C$.

לאחר מכן קבענו את מתח העצירה ל- $V_r = 1.5 \pm 0.1V$ בין האנודה לאלקטרודה המאספת. את המתח על הקתודה כיוונו כך שיזרום בה זרם של $260 \pm 10mA$.

בשלב זה ביצענו בעזרת תוכנת המחשב FranckHertz שינוי הדרגתי במתח ההאצה מ-0V עד 40V במרווחים של 0.2V בין דגימות ומדדנו את התלות של הזרם הנמדד בפיקואמפרמטר כתלות במתח ההאצה. התקבל הגרף הנ"ל:



גרף 1: זרם הפיקואמפרמטר כתלות במתח ההאצה

מצורתו האיכותית של הגרף ומכך שיש פיקים מובהקים ניתן להסיק שאכן יש רמות אנרגיה דיסקרטיות. ניתן לראות שהרווחים בין הפיקים בסדר גודל דומה אך אינם שווים לגמרי. משום כך ביצענו מיצוע על המרחקים בין הפיקים וקיבלנו את אנרגיית הערעור הראשונה של אטומי הכספית

$$E_{exc} = 4.97 \pm 0.08 eV$$

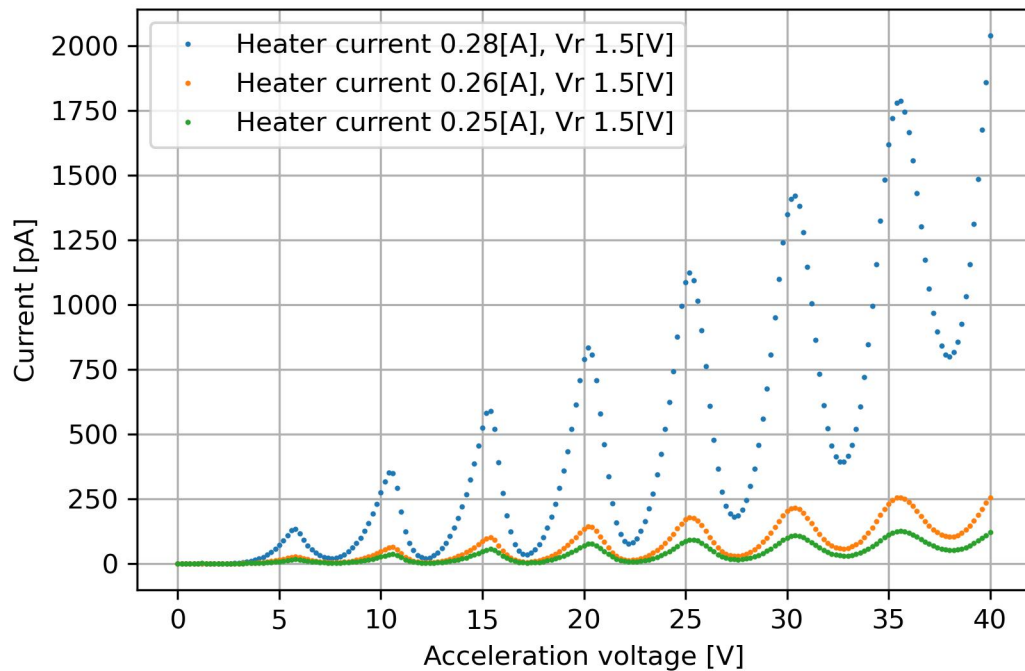
(שגיאות המדידה הנגררת חושבו לפי הנוסחא לשגיאה נגררת בנספח)

לשם השוואה חישבנו את אנרגיית הערעור הראשונה של כספית אשר מתקבלת ממדידה ספקטרוסקופית אשר מכיל קו פילטה יחיד עם אורך גל של $253.65nm$ (על פי התדריך) והתקבל הערך $E_{exc} = 4.888eV$ (מתוך הקשר $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$), כלומר הערך בקצה התחום של השגיאה.

את מתח המגע חישבנו מתוך הפיק הראשון אשר נמדד ב $5.8 \pm 0.2V$ ומתוך נוסחא 1 התקבל

$$\phi_A - \phi_K = 0.8 \pm 0.2V$$

לאחר מכן בדקנו מהי השפעת זרם החימום של הקתודה על עקום פרנק-הרץ. לשם כך שינינו את מתח הפעולה על הקתודה כך שיתקבלו זרמי חימום שונים. התקבלו הגרפים הבאים:

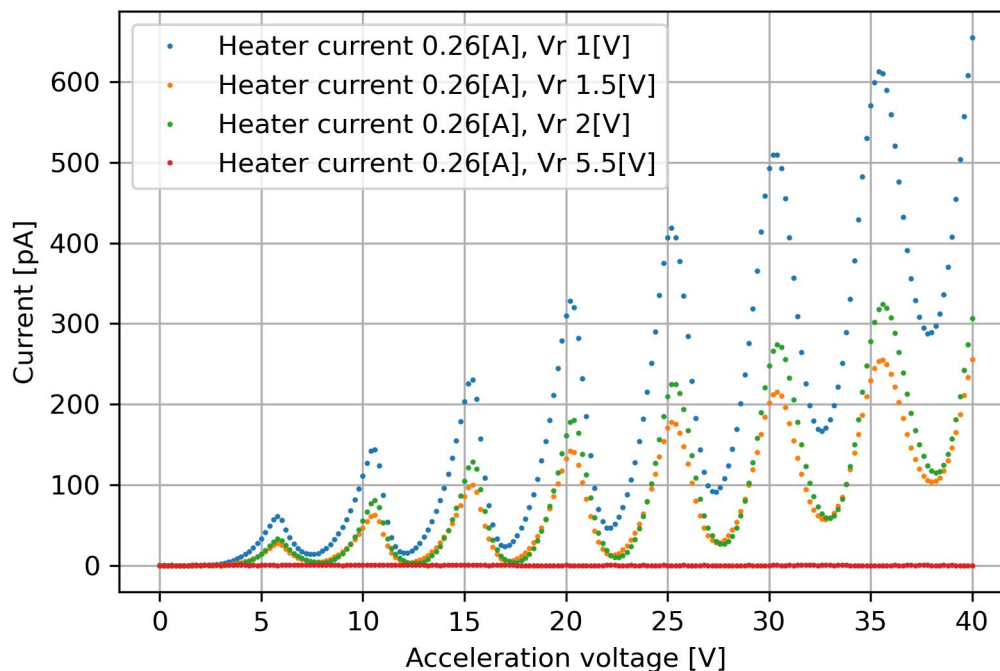


גרף 2: זרם הפיקואמפרמטר כתלות במתח ההאצה עבור זרמים הבאים: $250 \pm 10mA$, $260 \pm 10mA$, $280 \pm 10mA$

ניתן לראות באופן איכותי כצפוי מהתאוריה שככל שזרם החימום גדול יותר הזרם הנמדד גבוה יותר, זאת בשל כך שלאלקטרוניים הנפלטים יש יותר אנרגיה קינטית.

מעבר לכך נראה שהאקסטריותות התקבלו באותן מתחים ולא נראו שינויים נוספים.

לאחר מכן בדקנו את השפעת מתח העצירה על צורת עקום פרנק-הרץ. ביצענו מדידות עבור מתחי עצירה שונים והתקבלו הגרפים הבאים:



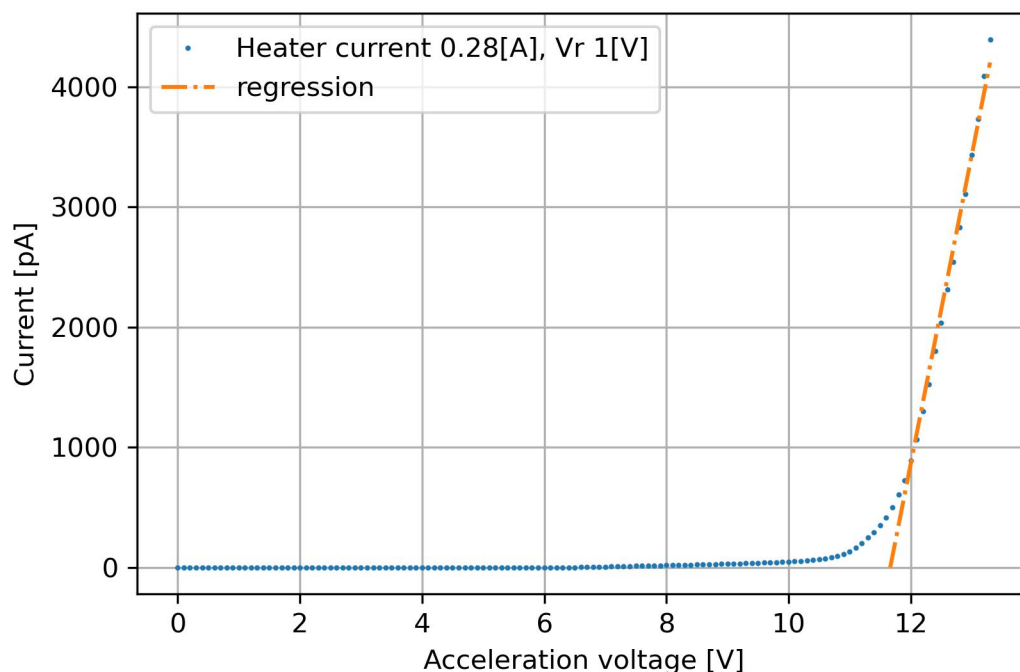
גרף 3: זרם הפיקואמפרמטר כתלות במתח ההאצה עבור מתחי העצירה

הבאים: $1 \pm 0.1V$, $1.5 \pm 0.1V$, $2 \pm 0.1V$, $5.5 \pm 0.1V$

ניתן לראות באופן איכותי שככל שמתח העצירה גבוה יותר הזרם הנמדד נמוך יותר. זאת בשל כך שמתח העצירה מעט את האלקטרונים לפני הגעתם לגלאי.

עבור מתח שגדול ממתח עצירה המתאים לאנרגיה של ערעור הכספית (הגרף האדום) ניתן לראות שאין זרם כלל, זאת מכיוון שאילו לאלקטרון היה מספיק אנרגיה בשביל לעבור, היה לו גם מספיק אנרגיה בשביל לערער אטום ולכן היה מערער אטום ומאבד מהאנרגיה. בשל כך לרוב המוחלט של האלקטרונים אין מספיק אנרגיה בשביל להתגבר על מתח העצירה.

הורדנו את טמפר' התנור ל' $108.4^\circ \pm 0.2^\circ C$, חיברנו את המעגל בהתאם לאיור 2, קבענו את זרם החימום בקתודה ל' $270 \pm 10 mA$ וקבענו את מתח העצירה ל' $V_r = 1 \pm 0.1 V$ בין הקתודה K לאלקטרודה המאספת M . ביצענו בעזרת תוכנת המחשב FranckHertz שינוי הדרגתי במתח ההאצה מ' $0V$ עד $13V$ במרווחים של $0.1V$ בין דגימות ומדדנו את התלות של הזרם הנמדד בפיקואמפרמטר כתלות במתח ההאצה. התקבל הגרף הנ"ל:



גרף 4: זרם הפיקואמפרמטר כתלות במתח ההאצה (בכחול) ורגרסיה של המקטע האחרון (בכתום)

כפי שניתן לראות מהגרף, הזרם הנמדד מתאפס לאורך רוב המתחים ולפתע מתחיל לעלות. ניתן להבחין שהעלייה מחולקת לשני שלבים, עלייה הדרגתית ועלייה שנמצאה להיות בקירוב טוב לינארית. אנו מייחסים את התופעה של העלייה ההדרגתית לאפקטים נוספים בניסוי שאינם בהכרח הינון (למשל השערה לכך היא מעבר אלקטרוניים ברמות אנרגיה שונות ועקב כך פליטת פוטונים שמגיעים ל' A ומייצרים זרם עקב אפקט פוטואלקטרי). בשביל לקבוע באופן מדויק את נקודת הינון ביצענו אקסטרפולציה לחלק הלינארי של הגרף. מתוך הרגרסיה לינארית על המקטע האחרון התקבלה המשוואה

$$y = (2570 \pm 67)x + (-30000 \pm 850)$$

בעל $R^2 = 0.990$ המעיד על התאמה לינארית סבירה.

נקודת החיתוך עם ציר ה- x המתקבלת ממנה

$$V = 11.7 \pm 0.5V$$

מתוכה בעזרת משוואה 1 ומתוך מתח המגע קיבלנו את אנרגיית היינון

$$E_{ion} = 10.8 \pm 0.5eV$$

לשם השוואה הערך המקובל בספרות הוא $E_{ion} = 10.4375eV$ כלומר הערך נמצא בתחום השגיאה.

דיון בתוצאות

בחלקו הראשון של הניסוי קיבלנו עקום פרנק-הרץ המתאים באופן איכותי לתאוריה לפיה יש רמות אנרגיה בדידות. מתוך הגרף חילצנו את אנרגיית הערעור הראשונה של כספית

$$E_{exc} = 4.97 \pm 0.08 eV$$

בעלת שגיאה יחסית של $\pm 1.6\%$, שגיאה זו נבעה מרמת הדיוק של מכשיר המדידה ורזולוציית המתחים שדגמנו. סיבה אפשרית נוספת היא שהתאוריה על פיה חישבנו את אנרגיית הערעור גורסת כי המרווח בין נקודות המינימום בגרף שווה עבור כל שתי נקודות סמוכות כאשר בפועל יש הפרש קטן שמוסבר במאמר (מקור 2) ולכן חוסר התחשבות באפקט זה עלול להניב שגיאות נוספות.

כמו כן חישבנו את הערך התיאורטי $E_{theory} = 4.888 eV$ המתקבל ממדידות ספקטרוסקופטיות וקיבלנו ערך הנמצא בקצה תחום השגיאה.

מתוך גרף 1 חילצנו גם את מתח המגע והתקבל הערך $\phi_A - \phi_K = 0.8 \pm 0.2 V$ בעל שגיאה יחסית גדולה של 25% הנובעת ישירות מרזולוציית הדגימה שהתבצעה.

בהמשך הניסוי ביצענו מדידות נוספת כאשר שינינו את זרם החימום של הקתודה ומתח העצירה. בהתאם לתאוריה קיבלנו שעבור זרם חימום גבוה הזרם הנמדד בפיקואמפרמטר גדל וזאת מפני שהאלקטרונים נפלטים עם אנרגיה קינטית גבוהה יותר. באופן דומה עבור מתח העצירה, ככל שהגדלנו את מתח העצירה הזרמים שנמדדו היו קטנים יותר וזאת היות והמתח הפעיל כוח אשר בלם את האלקטרונים וגרע מהאנרגיה הקינטית שלהם טרם הגעתם לגלאי. עבור מדידה בה מתח העצירה היה גבוה מהמתח המתאים לאנרגיית הערעור התקבל, בהתאם לצפוי מהתאוריה, שלא היה זרם כלל.

בחלקו השני של הניסוי נמדדה אנרגיית הינון של כספית והתקבלה התוצאה

$$E_{ion} = 10.8 \pm 0.5 eV$$

בעלת שגיאה יחסית של $\pm 4.63\%$, גם כאן שגיאה זו נבעה מדיוק מכשירי המדידה והרזולוציה הנדגמת, בנוסף לכך היה שימוש במתח המגע ולכן נוספה גם השגיאה הנגררת.

בהשוואה לגודל המקובל בספרות $E_{ion} = 10.4375 eV$ ניתן לראות שערך זה נמצא בתחום השגיאה.

מסקנות

משני חלקיו של הניסוי מצאנו התאמה לכך שישנם הפרשי אנרגיה בדידים בין רמות האנרגיה ושאכן ניתן לערר וליינן אטומים בעזרת התנגשות עם אלקטרונים. הפרש האנרגיה בין רמת היסוד לרמה המעוררת הראשונה שנמצא מכיל בטווח השגיאה שלו את הערך המקובל בספרות, עם שגיאה יחסית של 1.6%. אנרגיית היינון שנמצאה מתאימה גם היא לערך המקובל בספרות ומכילה אותו בטווח השגיאה עם שגיאה יחסית של 4.63%. תוצאות הניסוי מספקות באופן כללי התאמה לציפיה מהתיאוריה והערכים המקובלים בספרות.

תנאים אופטימליים למדידת עקום פרנק-הרץ יהיו תנאים שיביאו לעקום מרווח עם אקסטרימות מובהקות, מתוך המדידות שביצענו קיבלנו שתנאים אלו יתקיימו עבור זרם חימום גבוה ומתח עצירה נמוך משום שתנאים אלו מעצמים את הזרמים הנמדדים ובשל כך מקצינים את התופעות הנמדדות.

יש לציין ששיטת המדידה בחלק של מציאת אנרגיית היינון, בה בוצעה אקסטרפולציה לחלקו הלינארי של עקום המתח-זרם, הניחה קיום אפקטים נוספים שלא נחקרו לעומק. ניסוי המשך צריך לבדוק בצורה איכותית וכמותית את תופעות אלה ולתת להן הסבר מספק.

מקורות מידע

(1) תדריך פרנק-הרץ.

Rapier, Gerald, Klaus Sengstock, and Valery Baev. "New features of the Franck- Hertz experiment." American (2
journal of physics 74.5 (2006): 423-428

נספח

• הנוסחה בה השתמשנו לחישוב השגיאות הנגררות בניסוי:

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots}$$

כאשר $\delta x, \delta y, \dots$ הן השגיאות של x, y, \dots ו- δF היא השגיאה הנגררת של F , שהיא פונקציה של המשתנים x, y, \dots .

• הנוסחה בה השתמשנו לחישוב השגיאה היחסית בין הערכים המדודים לתיאורטיים בניסוי:

$$\xi_{rel \ err} = \frac{\delta v}{v} \cdot 100\%$$