

תדריך לניסוי בוואקום אולטרה גבוה

כללי

בניסוי זה התלמיד ילמד טכניקות ניסיוניות ליצירת וואקום אולטרה גבוה (וא"ג), ניתוח הפרמטרים המגבילים את הלחצים הסופיים, וניתוח גזים שיוריים (Residual Gas Analysis). הניסוי מתבצע במערכת וא"ג הנשאבת בעזרת משאבה טורבו-מולקולרית ומשאבה יונית. המערכת כוללת מכשיר לניתוח גזים שיוריים (RGA), מתקן להזלגה מבוקרת של חנקן וחמצן, ומערכת אפייה לפליטת גזים ספוחים (Bakeout). כרגיל במעבדה המתקדמת מצפים מהתלמיד ללמוד עצמי ובקורת עצמית. יחד עם זאת, מגבלות הזמן וכללי שמירת ציוד, מכתיבים את ההנחיות כדלהלן.

הכנה מוקדמת

בעיה דידקטית בהכנת ובביצוע ניסוי זה היא שהתלמיד מתבקש ללמוד ולעסוק בוא"ג לפני שעסק בוואקום נמוך, בינוני וגבוה (אם כי התלמידים שעשו את הניסוי במוליכות-על או באפקט הול עסקו באופן שטחי בוואקום נמוך). לכן אנו ממליצים גם על לימוד מקדים וכללי על וואקום (תחומי הוואקום, שיטות מדידה, הכרה שטחית של משאבת רוטציה ומשאבת דיפוזיה וכד'). רשימת ספרות מומלצת מובאת בסוף התדריך. להכנה המוקדמת מומלצים הספרים של J. F. O'Hanlon [1], של Weissler & Carlson [2], ושל Dushman & Lafferty [3]. כמו כן מומלץ לעיין בספרי ההוראות של יצרני הרכיבים השונים. ההדרכה המובאת להלן מומלצת כלימוד עצמי. הדו"ח המכין יוכן כהבנת התלמיד וכחלק אינטגרלי מהדו"ח הכללי.

החל את הלימוד על קינטיקה וזרימה של גזים, התחום הצמיג (הרציף) והתחום המולקולרי בזרימת גזים, והערכת הגבול ביניהם-כפונקציה של ממדי הכלי. איזה מהתחומים יותר רלוונטי לעבודתנו? מוליכות גזים ומוליכות חום ע"י גזים. עבור ללימוד ספיחה ושחרור גזים מפני מוצקים: נידוף, שחרור טרמי (thermal desorption). שחרור מסדר ראשון ושחרור מסדר שני, והסיבות הפיזיות והכימיות לקביעת הסדר. שחרור בהשראה אלקטרונית (ESD), בהשראה יונית (ISD), ובהשראה פוטונית (PD). תאר את המנגנונים לשחרור והשווה ביניהם. מסיסות גזים במוצקים, דיפוזיה של גזים במוצקים, והפרמטרים הקובעים את מהירותה. חשיבות הטמפרטורה לשחרור טרמי ולדיפוזיה. פרמיאציה (Permeation) של גז דרך מוצק.

עבור ללימוד בסיסי של יצור וואקום. מהירויות שאיבה של משאבות וואקום באופן כללי. השווה בין מוליכות גז (C), מהירות שאיבה (S), והעברה (Throughput-Q). מהו הקשר ביניהם ומהן יחידותיהם. אנו נניח משאבה בעלת מהירות S'. אם הלחץ במשאבה הוא P, בהזנחת שחרור מדפנות וספיחה עליהם, ההעברה בכניסה למשאבה היא: $Q(t) = S'P(t)$. אבל את ההעברה אפשר לתאר כשטף האנרגיה: $Q(t) = -d(PV') / dt = -kTdN / dt$, כאשר dN / dt הוא מספר המולקולות הנכנסות (נטו) למשאבה ביחידת הזמן, ו- V' הוא הנפח המשאבה. בהנחה שהמהירות קבועה אנו מקבלים: $dP / dt = -(S'/V')P(t)$ או $P(t) = P(0)\exp[(-S'/V')t]$. כאשר מחובר למשאבה מיכל כך שהנפח הכללי הוא V, והלחץ אחיד בכל המערכת, אז V' במשוואה האחרונה מוחלף ב-V. כאשר יש מפל לחץ אז יש מוליכות סופית C למערכת, ונפח כללי V, ואז קיים: $P(t) = P(0)\exp[(-S/V)t]$. כאשר $1/S = 1/S' + 1/C$. בהכללת שחרור גזים ספוחים-

Q_0 , גזים שיוצאים בדיפוזיה- Q_d , גזים שעוברים דרך הקירות (Permeation) - Q_p , וזרם חוזר מהמשאבה- Q_b , מקבלים :

$$P(t) = P(0) \exp - (S / V)t + (Q_0 / S) + (Q_d / S) + (Q_p / S) + (Q_b / S). \quad (1)$$

במשוואה (1) האיבר הראשון מגיע לערך מוזנה לאחר זמן קצר. למד על סדרי הגודל של האיברים האחרים ועל תלותם הזמנית. נניח שאנו שואפים ללחץ סופי של 10^{-10} torr, מהו סדר גודל הזמן הנחוץ על מנת שכל אחד מהאיברים יגיע לערך זה אם השאיבה מתבצעת בטמפרטורת החדר? הסבר למה נחוצה אפייה (Bakeout) של המערכת, ועל איזה מאיברי משוואה (1) האפייה הכי אפקטיבית? איך שני האיברים האחרונים מושפעים מהאפייה? באופן הפעלה נכון (כולל אפייה מספקת), מהו האיבר (או האיברים) הקובע את הלחץ הסופי המושג?

עבור ללימוד המכשור, ולמד את עקרונות הפעולה של משאבות טורבו-מולקולריות ומשאבות יוניות. למה משאבה טורבו-מולקולרית צריכה גיבוי של משאבה מכנית? מה קובע את מהירות הסיבוב הנחוצה במשאבה טורבו-מולקולרית? מהו מנגנון השאיבה של משאבה יונית? האם המולקולות הנשאבות נמצאות בסופו של דבר בקתודה או באנודה? מהו הלחץ המרבי לפעולתה של משאבה יונית, ולמה? איך עובד מודד לחץ מסוג Thermocouple (TC), מהם תחומי הלחץ של מדידתו, ולמה? איך עובד מודד לחץ מסוג Bayard –Alpert (BA)? הסבר את השיקולים למבנהו ולמתחים הניתנים לאלקטרודותיו השונות. מהם תחומי המדידה של מודד BA, ולמה? מה קורה בהפעלת הפונקציה Degas? מרכיב חשוב במערכת שלנו הוא ה-RGA. זהו מכשיר חדיש וממוחשב מתוצרת SRS, ובעל מפריד מסות מסוג Quadrupole Analyser. למד ביסודיות את המכשיר על כל חלקיו, מאפייניו ואופן הפעלתו. העזר לשם כך בספר של O'Hanlon [1], בספר של G. L. Weissler & R. W. Carlson [2], ובעיקר בספר המכשיר [4]. מה קובע את כושר ההפרדה ואת הרגישות של המכשיר? למה מולקולה אינה מתאפיינת בפיק אחד בלבד בציר המסות? מהו ה-cracking pattern, ומה יוצר אותו? אם למולקולות שונות יש פיקים חופפים אז איך אפשר לבצע אנליזה כמותית לגבי הלחצים החלקיים שלהם? במערכת שקיימים בה גם מולקולות חנקן וגם פחמן-חד-חמצני, איך נקבל את הלחצים החלקיים שלהם? מהם גורמי השגיאה לאנליזה זו?

עבודה ניסיונית

אזהרה

ניסוי זה מתבצע בעזרת ציוד מאוד יקר ופגיע בחלקו. עבודה עם מכשירים שלא בתחומי הלחץ המותרים עלולה לגרום נזק! חשוב לפני כל שלב, במיוחד לפני פתיחת ברזים ולפני הפעלת קתודות חמות. בהיותך בספק בטיחותי, שאל את המדריך. המערכת אמורה לעבוד בתחום ה- 10^{-10} torr ולעמוד בטמפרטורות אפייה גבוהות, לכן המערכת כוללת רק מתכות וקרמיקות העמידות בטמפרטורות גבוהות, וכן בעלי מסיסות ופרמיאציה נמוכות לגזים. המנע ממגע ידיים בחלקי המערכת בהיותה פתוחה! דיבור בקרבת חלקים חשופים עלול להותיר טיפות רוק זעירות, המנע מכך! העבודה מתבצעת בעזרת כפפות פלסטיק נקיות. שים גם לב שרוב מכשירי המערכת פועלים על מתח גבוה!

הערה

כאמור לעיל אנו שואפים לעבודה עצמאית של התלמיד. מאידך, קוצר הזמן, הגבלות בטיחות ושמירה על ציוד, מכתבות פרוט מסוים של הוראות העבודה. ההוראות הרשומות מטה כתובות באופן המהווה פשרה בין שתי המגמות הנ"ל. למשל אם כתוב: "בצע ספקטרום מסות ע"י ה-RGA", לא נאמר איך לבחור את קצב הסריקה ואת סקלת ציר ה-Y. דברים אלו ייבחרו ויבוצעו ע"י התלמיד. כמו כן על התלמיד להחליט באופן עצמאי איזה מה-DATA יישמר לשם הצגה ועיבוד, ואיזה ייזרק. ככלל יש לזכור **שעובדים בהתאם לכל ספרי המכשירים הרלוונטיים.**

העבודה בד"כ תחל כאשר המערכת סגורה ומלאה בחנקן יבש (לפעמים בחמצן יבש) בלחץ אטמוספירי. לעומת זאת, **המשאבה היונית תמצא תמיד בוואקום אולטרה גבוה** בעזרת "ברז השער" (Gate Valve) שמעל המשאבה. לפעמים יש צורך גם לפתוח את המערכת לשם החלפת דגם סיליקון לניסוי של דיפרקציית אלקטרונים (הממוקם באותה מערכת וואקום). במקרים אלו עבוד רק עם כלים נקיים כשידיך מוגנות בכפפות פלסטיק נקיות. דאג לכיסוי זמני של הפתח הפתוח למנוע חדירת אבק. לסגירת המערכת השתמש בטבעת אטימה חדשה מנחושת. התייעץ עם המדריך בדבר השיטה לסגירת הברגים.

לפני התחלת השאיבה וודא שכל הברזים סגורים. פתח את ברז השאיבה הגסה (Roughing) והפעל את המשאבה הטורבו-מולקולרית. הפעל גם את מודדי ה-TC ועקוב אחרי ירידת הלחץ. לאחר שמדי הלחץ הגיעו לגבול התחתון של תחוםם - 10^{-3} torr, **חכה לפחות 15 דקות** לפני הפעלת מודד ה-BA. בזמן הפעלת ה-BA על הלחץ להיות בתחום 10^{-5} torr. חכה מספיק זמן עד שהלחץ יגיע ל- 10^{-6} torr. בלחץ זה סגור את ברז השאיבה הגסה, ופתח את ברז השער. מעתה המערכת נשאבת ע"י המשאבה היונית, בעוד שהמשאבה הטורבו-מולקולרית ממשיכה לשאוב על הצינור הגמיש שמקשר למערכת. כבה את מפסק משאבת הטורבו.

תן למערכת לשאוב זמן מספיק עד שהלחץ יהיה באמצע התחום של 10^{-8} torr. **נהל רישום של כל הזמנים הרלוונטיים בהיסטוריית השאיבה של המערכת.** הפעל את ה-RGA הפעלה ממוחשבת. צפה בשינויי הלחץ בזמן חמום הקתודה של המכשיר. הפעל את פונקציית ה-Degas. פונקציה זו מפעילה אוטומטית סדרת פעולות הנמשכת כשלוש דקות והגורמת לשחרור הגזים הספוחים בסביבת המכשיר. צפה בעליית הלחץ בזמן ה-Degas, ולירידתו בגמר ה-Degas. כבה את מד הלחץ BA, ובצע ספקטרום מסות ע"י ה-RGA. תחום המסות הנסרקות צריך להיות 1-60 (על מנת לאפשר אנליזה כמותית). שים לב לפיקים העיקריים, איזה גזים קיימים כעת במערכת? תן למכשיר לסרוק פעם אחרי פעם באופן רציף. בצע אנליזה כמותית בדבר הלחצים החלקיים של הגזים השיוריים, ושמור את התוצאות. עבור לאופן סריקה של P vs. time, כך שעל ציר ה-Y יופיעו הלחצים החלקיים של מימן מולקולרי, מים, ופחמן חד חמצני. בחר פרמטרי סריקה אופטימליים. על כל הסריקה לקחת כ-40 דקות, ושלושת הלחצים החלקיים צריכים להיות משוקללים כך ששלושת הקווים יופיעו במיקום נוח יחסית באותה הסקלה. מספר דקות לאחר תחילת הסריקה, הפעל את מכשיר ה-BA ובחן את ההשפעה על שלושת הלחצים החלקיים. לאחר כחמש דקות הפעל Degas במכשיר ה-BA ובחן את ההשפעה על הלחצים החלקיים. השאר את ה-Degas בפעולה כ-4 דקות והפסק אותו, לאחר זמן מה הפסק גם את ה-Emission במכשיר ה-BA. חכה כחמש דקות וחזור על כל המחזור מההתחלה. נסה להסביר את כל השינויים שהתקבלו בשלושת הלחצים החלקיים בכל השלבים. נסה גם להסביר את ההבדל בין הלחץ שמורה ה-BA לבין קריאת הלחץ הטוטלי שמתקבלת בראש הגרף של P vs. time.

בצע את כל ההכנות הדרושות לאפיית המערכת. כבה את הקתודות של ה-RGA ושל ה-BA. נתק את הספקת הכוח ל-RGA, ונתק את היחידה האלקטרונית שלו מהמערכת! בדוק שכל המערכת (כולל המשאבה היונית) עטופה בסרט חימום המהודק היטב לדפנות. עטוף את כל המערכת בנייר אלומיניום והפעל את הספקת הכוח לסרטי החימום. חכה זמן מה תוך בדיקת ההתקדמות של תהליך החימום. בזמן זה בדוק גם את קצב עליית הלחץ (ע"י ספק הכוח של המשאבה היונית). אם הכל כשורה, עזוב את המערכת למספר שעות. אם השעה מאוחרת אפשר לעזוב את המערכת לאפיית לילה בתנאי שחוזרים בבוקר לכבותה. בגמר האפייה נתק את הספקת הכוח של סרטי החימום, והורד את נייר האלומיניום (בזהירות, לאפשר שימוש חוזר). יש לאפשר למערכת להגיע לטמפרטורת החדר, דבר שאורך שעות. לאחר הקירור, חבר בחזרה את היחידה האלקטרונית של ה-RGA. הפעל את מודד ה-BA למדידת לחץ. בצע שוב Degassing לשני המכשירים, אם הלחץ הסופי הוא בתחום ה- 10^{-10} torr המשך כדלהלן, אחרת יש לבדוק (יחד עם המדריך) מה לקוי במערכת.

חזור על המדידות שביצעת לפני האפייה על מנת לבחון את השינויים שחלו בעקבות האפייה. הסבר את הסיבה לשינויים אלו (דון בנפרד בגזים השיריים השונים ובשינוי היחסי שחל בלחציהם החלקיים). כעת לאחר שכל אחד מארבעת המחברים האחרונים במשוואה (1) קטן מהלחץ הסופי - P_f , יש אפשרות לבדוק את המחובר הראשון אם נכניס למערכת גז בלחץ $P(0) \gg P_f$, נפעיל את השאיבה ב- $t = 0$, ונבדוק את ירידת הלחץ כפונקציה של הזמן. הבעיה היא שמהירות התגובה של ה-RGA יותר קטנה מהיחס S/V . לכן נוכל רק להראות איכותית שהאיבר הראשון הוא מהיר מאוד בהשוואה לאחרים. הדרך לבצע מדידה כמותית למחצה היא להקטין את S ע"י הקטנת C – מוליכות המערכת. אנו נעשה זאת ע"י פתיחת ברז השער במידה קטנה ביותר. עשה זאת עד שהלחץ מתייצב באמצע סקלת 10^{-8} torr. לאחר שעשית זאת, הכנס (בזהירות רבה!) גז חנקן דרך ברז המחט, עד שהלחץ מתייצב באמצע סקלת 10^{-6} torr. כעת הפעל את ה-RGA לסריקה מהירה של $P(N_2)$ vs. time, וסגור את ברז המחט (והברז שנמצא בטור אליו). הסריקה תיתן לחץ יורד בקבוע זמן שאפשר לחלץ ממנו את V/S .

הצגת, עיבוד, וניתוח התוצאות

בניסוי הזה החלק של העיבוד המתמטי של התוצאות הוא קטן בהשוואה לחלק העוסק באינטרפוטציה ובהבנה איכותיים. רכז את כל התוצאות והכן אותם להצגה בדו"ח מסכם. בדו"ח המסכם ענה על כל השאלות שנשאלת בסעיף הקודם, בנוסף לדיון לפי הבנתך. בנה את הדו"ח כך שיהיה קל לקריאה מחד, אך איכותי וממצה מאידך. בדיון על השינויים שקרו לשלושת הלחצים החלקיים בגרף של P vs. time, הבחן בין שלושת הגזים ובסס את תשובותיך.

מהתוצאות של שאיבת החנקן, קזז את זמן התגובה של מכשיר המדידה, על מנת לקבל את קבוע הזמן לשאיבה. הערך באופן גיאומטרי את נפח המערכת, וקבל מזה את S . בידיעת מהירות השאיבה של המשאבה היונית (ניתנת בספר המכשיר) חשב את מוליכות המערכת C ודון בתוצאה.

רשימת ספרות

References

1. J. F. O'Hanlon, A User's Guide to Vacuum Technology. (John Wiley, 1989).
2. G. L. Weissler and R. W. Carlson, ed., Vacuum Physics and Technology. (Academic Press, 1979).

3. S. Dushman and J. M. Lafferty, ed., *Scientific Foundations of Vacuum Technique*. (John Wiley, 1962).
4. *Operating Manual and Programming Reference, Residual Gas Analyser, Model RGA100*. Stanford Research Systems (SRS, 1996).
5. *Instruction Manuals for MultiVac. Controller and VacIon Plus 300* (Varian, 1997).
6. *Instruction Manual for Multi-Gauge Controller* (Varian, 1998).
7. *Instruction Manual for Turbo-Dry V70* (Varian, 1997).

תדריך לניסוי בדיפרקציית אלקטרונים וספקטרוסקופיית אוג'ה מפני מוצק

כללי

בניסוי זה התלמיד יבחן משטחי פנים (מ"פ) של סיליקון גבישי בעזרת שתי טכניקות ידועות של בדיקת מ"פ: 1. דיפרקציית אלקטרונים באנרגיה נמוכה (Low Energy Electron Diffraction-LEED). 2. ספקטרוסקופיית אוג'ה (Auger). ניקוי משטחי הפנים (מה"פ) והרפייתם ייעשה בשיטה תרמית. הניסוי כולו ייעשה במערכת וואקום אולטרה גבוה (וא"ג). מהבחינה הבסיסית, הניסוי מקנה לתלמיד הכרה בלתי אמצעית של התופעה הקוונטית של דיפרקציית חלקיקים חומריים כמו אלקטרונים, ושל אפקט אוג'ה. מהבחינה המעשית, שתי טכניקות שטח אלו הן ידועות כבעלות חשיבות רבה באפיון ואנליזת מ"פ של מוצקים. נציין שאפיוני וטיפולי שטח מהווים מרכיבים חשובים בחקירת ובתעשיית אלמנטים אלקטרוניים מודרניים.

דרישה מוקדמת: הניסוי של UHV יבוצע לפני ניסוי זה כדרישה מוקדמת.

הכנה מוקדמת

כרגיל בניסויי המעבדה המתקדמת, התלמיד כותב דו"ח מכין ונבחן על מידת מוכנותו לניסוי. החומר להלן ישמש כהנחיה לתלמיד, אך אינו חייב בהכרח להופיע בשלמותו בדו"ח המכין. הדו"ח המכין ייכתב כהבנתו של התלמיד, כך שיהווה חיבור שלם, שימושי ורלוונטי. ספרות לימוד מתאימה ימצא התלמיד ברשימת הספרות המופיעה בסוף התדריך. חומר הרקע מתחלק כרגיל לרקע תיאורטי כללי ולהכרת המכשור.

א. רקע כללי לאנליזת משטחי פנים

וא"ג הנו חיוני לאנליזה של מרבית משטחי הפנים (מה"פ). הסבר למה ותן הערכה ללחץ המינימלי הדרוש לאנליזת מ"פ, הבחן בין לחצים חלקיים של גזים שונים. מייין את השיטות הנפוצות לניקוי מקדים של מ"פ, תוך דיון ביתרונותיהן וחסרונותיהן.

שתי שיטות המדידה בניסוי זה מבוססות על קרן אלקטרונים ראשונית הפוגעת במשטח הפנים של דגם סיליקון גבישי. כתוצאה מכך יוצאים מפני המשטח אלקטרונים לתוך הוואקום. דון באלקטרונים אלו תוך מיונם לסוגים שונים, ותוך התייחסות לאנרגייתם כתלות באנרגיית האלקטרונים הראשוניים. הרחב את הדיון בשאלת שיקולי הבחירה של אנרגיית האלקטרונים הראשוניים בכל אחת משתי טכניקות המדידה. דון במהלך החופשי האינאלסטי של האלקטרונים כתלות באנרגייתם, האם פונקציה זו תלויה חזק בחומר, או שהיא כמעט אוניברסלית? בסס את הטענה שמדידותינו הן אמנם מדידות מ"פ. איזה משתי השיטות היא קצת פחות מדידת מ"פ מובהקת, באשר היא דוגמת עומקים קצת יותר גדולים?

ב. דיפרקציית אלקטרונים באנרגיה נמוכה מפני מוצק

חזור על החומר היסודי במכניקת הקוונטים בדבר הדואליות בין חלקיק לגל ובדבר הקשר בין אורך הגל של דה-ברולי לבין אנרגיית החלקיק. למד על סדר גבישי בשניים ובשלושה ממדים. מהם חמשת

סריגי ברווה, ומהם 17 פעולות הסימטרייה במקרה הדו-ממדי? מהו הסריג ההופכי וכיצד הוא קשור לדיפרקצייה? הבחן בין המקרה התלת-ממדי למקרה הדו-ממדי. מהם מישורים גבישיים, במקרה התלת-ממדי, וישרים גבישיים במקרה הדו-ממדי, וכיצד הם נכתבים בעזרת אינדקסי מילר? מה הקשר בינם לבין וקטורי הסריג ההופכי? כתוב את כלל ברג לדיפרקצייה במקרה הדו-ממדי. הסבר למה הקריטריון לדיפרקצייה במקרה הדו-ממדי הוא פחות אקוטי מאשר במקרה התלת-ממדי.

במדידות ה-LEED שנבצע, יורים קרן ממוקדת של אלקטרונים בעלי אנרגיה E בניצב לפני המשטח. חלק מאלקטרונים אלו מוחזרים אלסטית תוך דיפרקצייה, שבמקרה הגבישי גורמת ליצירת מספר קרניים ממוקדות, המשאירות מספר נקודות זוהרות על פני המסך הפלוריסנטי החצי-כדורי. איך לדעתך צריך להשתנות מקומן של נקודות הדיפרקצייה כאשר משנים באופן רציף את אנרגיית האלקטרונים? חוץ ממקומן של הנקודות, מה עוד צריך להשתנות, ולמה? כתוב ביטוי לעוצמה של האלקטרונים המוחזרים אלסטית ממשטח של גביש דו-ממדי המכיל מספר אטומי בסיס בכל תא יחידה. בביטוי שכתבת הבחן בפקטור המבנה ובפקטור הקוהרנטיות. איזה פקטור נותן את תלות העוצמה באנרגיה? חקירה שלמה ומדויקת של תלות תמונת הדיפרקצייה באנרגיה (כולל העוצמה), אמורה לספק אינפורמציה על מקומו המדויק של כל אטום בתא היחידה. הסבר למה אנליזה כזו היא יותר קשה ובעייתית במקרה של ניסוי LEED מאשר במקרה של דיפרקציית קרני X מגביש תלת-ממדי. מהם המודלים התיאורטיים המטפלים בקשיים אלו?

אילו פגמים קיימים על פני גבישים ואיך הם מתבטאים בתמונת הדיפרקצייה? ממה נגרמת הארת הרקע בניסויי LEED, וכיצד ניתן למזער אותה? מהם הגורמים להרחבה של נקודות הדיפרקצייה?

ג. ספקטרוסקופיית אוג'ה מפני מוצקים

אפקט אוג'ה קורה כאשר האנרגיה שנוצרת כתוצאה של דעיכת חור מרמת ליבה (core level) משמשת לפליטת אלקטרון (במקום ליצירת פוטון). באפקט מעורבים שלושה אלקטרונים: הראשון נפלט מרמת הליבה, כתוצאה מהפעלת גורם חיצוני מיונן (בד"כ קרן אלקטרונים חיצונית). השני עובר מרמה גבוהה לרמת הליבה תוך מסירת קוונט אנרגיה לאלקטרון שלישי, שעובר לרמת אנרגיה גבוהה מרמת הוואקום ונפלט מפני המוצק. אנרגייתו הקינטית של אלקטרון שלישי זה נמדדת בעזרת הספקטרומטר של אוג'ה, ומשמשת לזיהויו של האטום. בגישה פשטנית אנרגיה זו ניתנת ע"י:

$$E = |E_C| - |E_A| - |E_B| \quad (1)$$

כאשר E_C היא אנרגיית רמת הליבה האטומית ו- $E_{A,B}$ הן האנרגיות של שתי הרמות האלקטרוניות האחרות. כיון שאנרגיות אלו הן שליליות, ניתנים במשוואה ערכיהם המוחלטים (המסמנים אנרגיות קשר). הסבר למה משוואה (1) אינה מדויקת גם באופן עקרוני, ואיזה תיקון צריך לבצע בה גם במקרה הפשוט של גז אטומי. נציין שאלקטרוני האוג'ה הנפלטים מסומנים בעזרת שלושת המצבים האלקטרוניים הריליונטיים. סימון המצבים נעשה כמקובל בפיסיקה אטומית כאשר הקליפות 1,2,3... מסומנות

באותיות K,L,M... , בהתאמה. לדוגמא ניקח אטום חמצן: לאטום זה שתי קליפות, לכן רמת הליבה חייבת להיות K, בעוד ששתי הרמות האחרות הן L. לכן אטום החמצן יכול לפלוט אלקטרון אוג'ה KLL. כאשר רמה מסוימת מכילה את אלקטרוני הערכיות, אז אפשר להחליף את הסימון שלה באות V. אנו מעוניינים בספקטרוסקופיית אוג'ה מפני מוצק, היכן שיש אינטרקציות חזקות בין אטומים שכנים, וגם בין אלקטרוני אוג'ה הנפלטים לבין סביבתם. הסבר כיצד זה משפיע על אנרגייתו של פולס האוג'ה, וכן על רוחבו וצורתו. לעיתים נכתב שצורתו של פולס האוג'ה משמשת כטביעת אצבעות לזיהוי החומר, הסבר למה הכוונה. בניסוי שלנו אנו בודקים משטחי פנים של סיליקון שלפני טיפול השטח עשויים להיות מכוסים בשכבות תחמוצת דקות. זה אומר שאנו מצפים לפיק LVV של סיליקון, ולפיק KVV של חמצן (לסיליקון יש גם פיק של KLL בסביבות 1800V, אבל הוא מחוץ לתחום סקירת האנרגיה שלנו). מהו לדעתך המודל התיאורטי הפשוט ביותר להסברת צורת פיקים אלו, ומהם חסרונותיו? מהם המודלים שמכילים תיקונים למודל פשוט זה?

ד. משטחי הפנים (100) ו-(111) של סיליקון.

לאטום הסיליקון שתי קליפות אלקטרוניות סגורות, ובקליפה השלישית שני אלקטרוני s ושני אלקטרוני p. ארבעת אלקטרוני ערכיות אלו מתערבבים בהיברידיזציה ויוצרים אונות המכוונות לארבעת קדקודי טטרהדר (שהאטום במרכזו). בכיוונים אלו הם יוצרים קשרים קוולנטיים לשכניהם הקרובים, תוך יצירת המבנה הגבישי - fcc (כמו ביהלום). למד על המבנה הגבישי fcc בפרט. צייר באופן תלת ממדי גביש סיליקון וסמן באופן גרפי כלשהו את המישור (100). שים לב לכיווני הקשרים הקוולנטיים ביחס למישור. דמיון לעצמך את ביקוע הגביש במישור זה, וזהה את האונות האלקטרוניות הנשארות בלתי מקושרות כתוצאה מהביקוע. קשרים בלתי מיושמים אלו נקראים Dangling Bonds (קשרים מתנדודים). איך לדעתך השתנה מצבו האנרגטי של המישור כתוצאה מהביקוע? ומה עשויים אלקטרוני השפה לעשות על מנת לקזז שינוי אנרגטי זה? הסבר את מושג הרקונסטרוקציה של פני מוצק! סיליקון באוריינטציה (100), לאחר חימום לסילוק התחמוצת, מתייצב ברקונסטרוקציה (2X1). הסבר את משמעות הדבר! מהם המודלים שהוצעו להסברת רקונסטרוקציה זו? במבנה זה מוכפל אורכו של קבוע הסריג בכיוון אחד, אך נשאר ללא שינוי בכיוון הניצב לו. זה שובר את הסימטריה לסיבוב בתשעים מעלות. אם כך הסבר למה תמונת הדיפרקציה הניסיונית נראית סימטרית לסיבוב כזה?!

עשה לגבי המישור (111) את כל מה שעשית למישור (100). למישור זה יש מספר מצבי רקונסטרוקציה בהתאם לטיפול. המצב הנחקר ביותר הוא רקונסטרוקציה (7X7). למד על מצב זה גם מבחינת תמונת הדיפרקציה וגם מבחינת הצעות מודלים למה שקורה במישור האמיתי. בשני המישורים ניתן לקבל את המבנה ללא רקונסטרוקציה, כלומר (1X1), אם חושפים את המשטח למימן אטומי בטמפרטורה מסוימת. הסבר מה קורה במצב הזה, וכן למה נזקקים למימן אטומי?

ה. מכשור

החלק המרכזי במכשור הנו מכשיר הממוקם במערכת הוא"ג, הכולל: תותח אלקטרונים וכן מערכת סריגים ומסך פלוריסנטי הימיספיריים (חצאי כדורים ממורכזים). מכשיר זה משמש למדידת דיפרקציית האלקטרונים, ולספקטרוסקופיית אוג'ה כאחד, אלא שבתפקידו הראשון הוא נקרא LEED OPTICS

(LO) , ובתפקידו השני- Retarding Field Analyzer (RFA). למד מהספרות את אופן תפקודו של המכשיר בשני אופני התפקוד. למד מספר המכשיר את סכימת החיבורים של ארבעת סריגיו בכל אחת מצורות השימוש. בחיבורו כ- LO , איזה פוטנציאל ניתן לסריג המעכב (Retarding Grid) , ולמה ? ישנם מכשירי RFA בעלי שלושה סריגים. אם כך , למה מוסיפים את הסריג הרביעי במכשירים מסוג זה שבשימוש אצלנו? מה הסיבות לשני הסריגים הקיצוניים ולחיבורם לפוטנציאל אפס? דון ביתרונותיו ובחסרונותיו של ה- RFA!

אם ההתפלגות האנרגטית של האלקטרונים המוחזרים היא $N(E)$, כתוב ביטוי לזרם האלקטרונים הנקלטים במסך הפלוריסנטי. איך נמצא באופן ניסיוני את ההתפלגות $N(E)$? באופן מעשי אנו מעדיפים למדוד את הנגזרת $dN(E)/dE$, הסבר למה. כמו כן הסבר למה מדידת ההרמוניה השניה בעזרת מגבר הנעילה (Lock-in Amplifier) נותנת את הפונקציה הנדונה.

עבודה ניסיונית

הוראות סעיף זה מניחות שבמחזיק הדגמים מותקנים שני דגמי סיליקון מתאימים, באוריינטציות (100) ו- (111), ושהמערכת נשאבה וטופלה תרמית כך שכבר הגיעה לוואקום בחלק הנמוך של התחום 10^{-10} Torr. כמו כן מניחים אנו שהדגמים מכוסים בשכבה דקה של תחמוצת. אם המצב אינו כזה, אז יש להתקין דגמים חדשים תוך נוהלי עבודה מחמירים מבחינת הקפדה על ניקיון (עבודה בכפפות גומי, חלקים נקיים וכד'). מיקום הדגמים במחזיק הדגמים ושיטת התקנתם ילוו בהשגחה צמודה של המדריך. לאחר מכן תבוצע אטימת וואקום ושאיבה של המערכת בהתאם למוסבר בניסוי וא"ג. כאשר התנאים לעיל מתקיימים אנו מתחילים בתהליך של טיפולים תרמיים של הדגמים. הדגמים מחוממים ע"י הזרמת זרם ישר דרכם תוך שימוש בהתנגדות האומית של הדגמים עצמם ליצירת החום. בסיומו של כל שלב בטיפול התרמי, אנו נבצע מדידות. התלמיד מתבקש לעקוב אחרי ההנחיות הבאות, ולהקפיד על כללי הזהירות כדלהלן:

א. הטיפולים ייעשו בשלבים הדרגתיים. בכל שלב כזה הזרם דרך הדגם יהיה גבוה בחצי אמפר מהזרם שהוזרם דרכו בשלב הקודם. העלייה לזרם הרצוי בכל שלב, תעשה תמיד באיטיות תוך מעקב אחרי עליית הלחץ שנגרמת מפליטה תרמית של גזים. לחץ גבוה מדי כאשר הדגם חם עלול לגרום לשינוי כימי של פני הדגם! אם הלחץ עולה מעל ל- 4×10^{-9} Torr, יש להפסיק את החימום, לחכות לירידת הלחץ ולהתחיל לחמם באיטיות מחדש. בכל שלב כזה יש להישאר באותו זרם כשתי דקות לאחר ההתייצבות, ובמצב זה למדוד את מפל המתח על הדגם. מובן מאליו שהספק מופעל **כמקור זרם** והזרם הוא כמו שנקבע בהתאם לשלב. מנת המתח בזרם תיתן לנו (בהזנחת פוטנציאל המגעים) את התנגדות הדגם, שממנה נוכל לחשב את הטמפרטורה.

ב. לאחר כל שלב המתאים למספר לא שלם של אמפרים, יש לבצע מדידות אוג'ה ומדידות LEED, בהתאם להנחיות שבספר המכשיר. שים לב שבספר המכשיר יש תהליך מקדים של Filament Degassing ושל Auger System Nulling, שיש לעשותם באופן חד פעמי ולא לפני כל מדידה. כמו כן

שים לב לשינוי החיבורים שצריך לעשות במעבר בין המדידות השונות וכן בין שלב המדידות לשלב של חימום הדגם. במעברים נתק את המתח הגבוה והורד את החימום הקטודי למניעת פליטה טרמיונית. בצע את סריקות האנרגיה במדידות האוג'ה באיטיות מספיקה, ותוך בחירת קבועי זמן גדולים, להורדת הרעש. הקפד לשמור את כל התוצאות המשמעותיות: תמונות דיפרקציה יופקו במספר אנרגיות אלקטרוניות (המייצגות שינוי מרבי של עוצמות), ויצולמו במצלמה דיגיטלית. הקפד לכלול בתמונה את המסגרת המתכתית העגולה של המכשיר כדי שתשמש כקנה מידה. כמו כן, סובב את הדגם לכיוול הזווית המתאימה לסטייה מהמרכז עד למסגרת זו (או מצא שיטה אחרת להפיכת מרחקים לזוויות). ספקטרומים של אוג'ה יישמרו כקבצים של מחשב או כגרפים (של רשם גרפים). יש להקפיד במיוחד במדידות שלאחר השלב התרמי הסופי, שכן בשלב זה אנו אמורים לקבל תוצאות אופטימליות, כולל רקונסטרוקציות. אפשר לדלג על מספר מדידות אוג'ה לפני שלב סופי זה, בתנאי שבכולן אין נוכחות חמצן ואין שינויי צורה של פיק הסיליקון.

ג. לאחר גמר המדידות יש להחזיר את פני הדגמים למצבם ההתחלתי, כלומר, לכסותם בשכבת תחמוצת דקה. לשם כך הכנס למערכת חמצן בלחץ של 10^{-5} Torr (כבה את מודד הלחץ מיד לאחר התייצבותו), וחמם את הדגמים בזרם של 1.5A למשך 10 דקות. לאחר מכן הפסק את החימום ושלב מחדש. חזור על בדיקת אוג'ה לוודא שהדגמים התחמצנו!

עיבוד התוצאות

א. כללי

מצא את הטמפרטורות המתאימות לכל זרם דגם שהפעלת. עשה זאת בעזרת פונקציית ההתנגדות כתלות בטמפרטורה. לידעתך גבישי הסיליקון שלנו הם מסוג P ומזוהמים באטומי בור. לצורך החישוב הזנה את פוטנציאלי המגע. דון בהצדקה להזנה זו.

ב. תוצאות ה-LEED

נתחיל במ"פ (100). בדוק בעיון את תמונות הדיפרקציה שקיבלת בכל שלבי הטיפול התרמי. הבחן בסימטריות שהתקבלו והשווה אותן לצפוי בהתאם לספרות. האם קבלת תמונת דיפרקציה המתאימה לרקונסטרוקציה (1x2)? אם כן הסבר! דון בהופעת נקודות הדיפרקציה הנוספות בסימטרייה (1x2), כפונקציה של חמום הדגם. הערך את קבוע הסריג מתוך תמונות הדיפרקציה. הסבר בפרוט את שיטתך. בצע ניתוח דומה לתוצאות במה"פ (111). האם קבלת תמונת רקונסטרוקציה (7x7)? אם לא דון בסיבות אפשריות. השווה בין הסימטריות בשני המקרים. הערך את קבוע הסריג והשווה אותו לקבוע שקבלת קודם. מה הקשר ביניהם?

דון באופן כללי באספקטים שונים של התוצאות (כמו למשל תזוזת התמונה כתלות באנרגיה, רעש רקע, חוסר חדות וכד') ותלותם בפרמטרים רלוונטיים.

ג. תוצאות האוג'ה

בשני הדגמים, הצג סידרה של ספקטרומים כפונקציה של טמפרטורת הטיפול התרמי. כמדד לכמות החומר אפשר לקחת את השטח שמתחת לפיק השלילי. בהנחה שדגימת האוג'ה דועכת אקספוננציאלית

לעומק הדגמים, מהו קבוע הדעיכה? הצג באופן גרפי את כמויות החמצן והסיליקון על פני הדגמים כתלות בטמפרטורת החימום. השווה את צורות הפיקים של החמצן לפיקים שמופיעים בספרות לחמצן ב- SiO_2 , מה הסיבות להבדלים? דון בצורות הפיקים של הסיליקון כתלות בכמות החמצן על פני השטח. דון באלמנטים בולטים הקיימים בצורות הפיקים של המשטחים הנקיים, מהו מקורם?

רשימת ספרות מומלצת

References

1. M.A. Van Hove, W.H. Weinberg, and C.M. Chan, Low Energy Electron Diffraction (Springer-Verlag, 1986).
2. D.P. Woodruff, T.A. Delchar, Modern Techniques of Surface Science (Cambridge, 1986).
3. D. Briggs, M.P. Seah, editors, Practical Surface Analysis (John Wiley & Sons, 1983).
4. S.J. White, D.P. Woodruff, Surface Science **63**, 254 (1977).
5. J.J. Lander, G.W. Gobeli, and J. Morrison, J. Appl. Phys. **34**, 2298 (1963).
6. Rear View LEED Operating Manual, VG Microtech. This Instruction Manual is to be used only at the Lab.