

מכשיר למדידת התנגדות המגע בין מתכת ומוליך למחצה תרמואלקטרי

מ' לנקסבר, מ' נחמדי, ב' מאירי, י' שילדקראוט

שכט תשלי"ט - פברואר 1979

RECEIVED 20 May 1979

English title and abstract included

קריה למחקר גרעיני - ננב



הוועדה לאנרגיה אטומית

ISRAEL ATOMIC ENERGY COMMISSION, NUCLEAR RESEARCH CENTRE-NEGEV

LEGAL NOTICE

This publication is issued by the Nuclear Research Centre - Negev, Israel Atomic Energy Commission. Neither the Nuclear Research Centre - Negev, nor its contractors, nor any person acting on their behalf or on behalf of the Israel Atomic Energy Commission

make any warranty or representation, express or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this publication, or that the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication will not infringe upon privately owned rights, or

assume any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this publication.

Mention of commercial products, their manufacturers, or their suppliers in this publication does not imply or connote approval or disapproval of the products by the Nuclear Research Centre - Negev or by the Israel Atomic Energy Commission.

הודעה משפטית

פרסום זה מונח לצורך עילוי הקריה למחקר גרעיני—מגב, הוועדה לאנרגיה אטומית של ישראל.

הקריה למחקר גרעיני — מגב והפעלים מטעמה או בשמה, או מטעם הוועדה לאנרגיה אטומית של ישראל או בשמה

אינם אחראים או ערבים, אחריות או ערבות כלשהי, במפורש או שלא במפורש, לדיוק, לשלמות ולשייכות של המידע הכלול בפרסום זה או לכך שהשימוש בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הנתון בפרסום זה לא יפגע בזכויות פרטיות של אחרים.

ואינם מקבלים על עצמם כל התחייבות בגין חי שימוש או טקני השימוש בכל מידע, מכשיר, שיטה או תהליך הנתון בפרסום זה.

הזכר על מוצרים מסחריים, של יצרניהם או של ספקיהם בפרסום זה אין משמש אישור המוצרים על-ידי הקריה למחקר גרעיני — מגב או על-ידי הוועדה לאנרגיה אטומית של ישראל.

This publication and more information about its subject matter may be obtained at the following address:

Scientific and Technical Information Department
Nuclear Research Centre - Negev
P. O. Box 1987
84 198 Be'er-Sheva, ISRAEL

ניתן להשיג את הפרסום החזר וכן מידע נוסף בנושא הפרסום על-ידי מניח לתובנה:

יחידת המידע
הקריה למחקר גרעיני — מגב (1987)
תיבת דואר 1987
84 198 בער-שבע

מכשיר למדידת התנגדות המגע בין מתכת ומוליך למחצה תרמואלקטרי

מ' לנקסנר, מ' נחמדי, ב' מאירי, י' שילדקראוט

שבט תשל"ט - פברואר 1979

תקציר

מתואר מכשיר למדידת התנגדות המגע החשמלית בין מתכת לבין מוליך למחצה תרמואלקטרי, ומצויינות השגיאות הצפויות במדידה. המדידה מבוססת על דגימת המתח בכיוון הניצב למישור החיבור, ובוצעה במקרה זה בחיבורי פלריום וחומר תרמואלקטרי על בסיס ביסמות טלוריר.

INSTRUMENT FOR MEASURING METAL - THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR
CONTACT RESISTANCE

Michael LANXNER, Menachem NECHMADI, Benjamin MEIRI, and Ichak SCHILDKRAUT

February 1979

ABSTRACT

An instrument for measuring electrical, metal-thermoelectric semiconductor contact resistance is described. The expected errors of measurement are indicated. The operation of the instrument which is based on potential traversing perpendicularly to the contact plane is illustrated for the case of contacts of palladium and bismuth telluride-based thermoelectric material.

עמודתוכן העניינים

1	מבוא	1
3	הדגם וסביבתו	2
5	המעגל האלקטרוני	3
6	המערכת המיכנית	4
7	מדירות	5
9	סיכום	6
9	6.1 שגיאות הנובעות ממכשיר המדידה	
9	6.2 שגיאות הנובעות מאופי הדגמים	
11	נספח 1 הכנת גשש טונוגסטן	
12	סימוכין	

1 מבוא

אחד השלבים הקריטיים בהכנת התקנים תרמואלקטריים הוא תהליך ייצור החיבורים החשמליים שתפקידם לגשר בין אלמנטי המוליך למחצה מסוג n והמוליך למחצה מסוג p. כאשר קיימת התנגדות גבוהה באיזורים אלה, אם כתוצאה מזיקון בטמפרטורת העבודה ואם כתוצאה מתהליך חיבור לא מוצלח, ההתקן יפעל ביעילות נמוכה יותר, מכיוון שההתנגדות הפנימית שלו R_i תעלה על פי הקשר:

$$R_i = \frac{2L}{A} \left(\rho + \frac{2\rho_c}{L} \right) \quad [1]$$

כאשר:

ρ התנגדות חשמלית סגולית של החומר התרמואלקטרי (ממיעע על צמד);

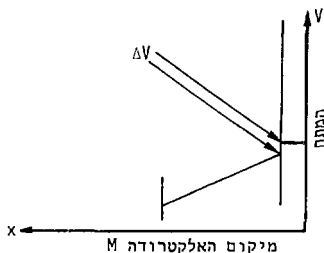
L אורך המוט התרמואלקטרי;

A שטח חתך המוט התרמואלקטרי;

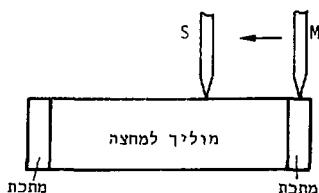
ρ_c התנגדות המגע בין מתכת ומוליך למחצה תרמואלקטרי [התנגדות-אשטח].

היכולת למדוד את התנגדות המגע, בשלבי הייצור וכעבור תקופת זיקון וצוייה, מאפשרת חיזוי טוב יותר בעת תכנונם של התקנים תרמואלקטריים ותורמת יכות לפיתוחם של חיבורים חשמליים נמוכי התנגדות מגע ויציבים לאורך זמן.

המכשיר למדידת התנגדות מגע המתואר בדו"ח זה מבוסס על השיטה שפותחה על-ידי Mengali and Seiler⁽⁴⁾ והוא מתואר בצירור 1.



(ב)



(א)

צירור 1 עקרון מדידת התנגדות המגע בין מתכת ומוליך למחצה.

- (א) דגימת המתח באיזור החיבור על-ידי האלקטרודות M ו-S.
 (ב) תיאור גרפי של הוצאות המדידה (א) כש- ΔV מציינ את מדרגת המתח באיזור החיבור.

המתח שכיו האלקטרורות המחודרות שבציור 1(א), הנוצר על-ידי זרם חשמלי דרך ה"כריך" מתכת - מוליך למחצה (חומר תרמואלקטרי) - מתכת, נדגם תוך כדי מעבר דרך הגבול מתכת - מוליך למחצה. משני עברי גבול זה יוצרות נקורות המדידה ישירים בעלי שיפועים המתאימים להתנגדות המתכת והמוליך למחצה [ראה ציור 1(ב)]. ההפרש בין נקורות החיתוך שלהם וקו הגבול (ΔV) מאפשר את חישוב התנגדות המגע הסגולית באופן הבא:

$$\rho_c = \frac{\Delta V}{I} \cdot A \quad [2]$$

כאשר:

ρ_c התנגדות המגע הסגולית [$\Omega \cdot \text{cm}^2$];

ΔV מדרגת הפוטנציאל באיזור המגע;

I הזרם דרך הצומת;

A שטח המגע.

שלוש דרישות עיקריות צריכות להתמלא כדי לקבל תוצאות מדידה אמיתיות ועקביות:

(א) הזרם דרך הדגם צריך להיות חילופי בכדי למנוע הפרעות של מחחים תרמואלקטריים המתלווים לזרם ישר.

(ב) אות המדידה, בהיותו מתח חילופין נמוך, רגיש ביותר להפרעות, ולכן יש לנקוט שיטות מיוחדות למדידתו.

(ג) יש לקבוע את מיקום הצומת מתכת - מוליך למחצה יחסית לנקודות המדידה, בדיוק רב; אחרת אין ערך לאינטרפולציות המודגמות בציור 1(ב).

נפרט להלן את מכשיר המדידה תוך הדגשת מילוי הדרישות הנ"ל.

את מכשיר המדידה ניתן לחלק לשלושה:

(א) הדגם וסביבתו.

(ב) המערכת האלקטרונית.

(ג) המערכת המיכנית.

2 הדגם וסכ-בני

דגם סטנדרטי למדידות התנגדות מגע כולל מתכת ומוליך למחצה המחוברים זה לזה
בשיטה כלשהי. ציור 2 מתאר דגם כזה, ודוגמתו מופיעים בספרות⁽¹⁾.

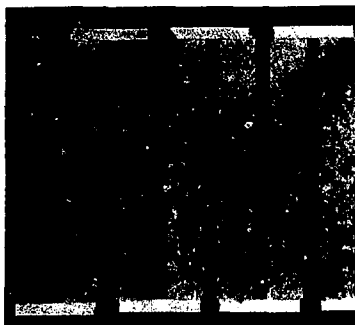
ציור 2

דגם סטנדרטי למדידות
התנגדות מגע.

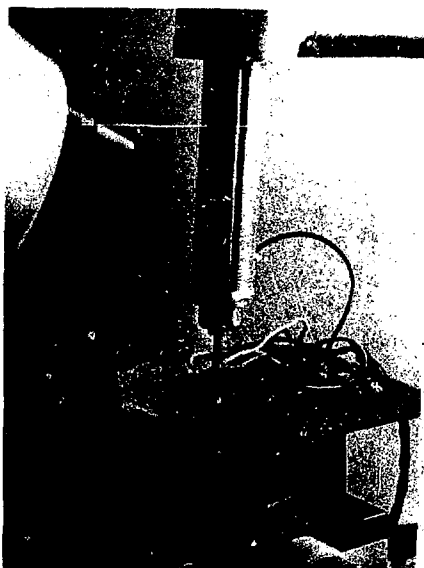
במהלך הניסויים התברר כי הכנת דגמים מיוחדים למדידות אלה כרוכה כבזבז חומר,
מה גם שמדידות ישירות על דגמים הדהים מכחינה גיאומטרית: להתקנים שעסקנו
בפיתוחם יאפשרו ניתוח מהימן יותר של חיבורים ספציפיים אלה. לכן, הוחלט לבצע
את המדידות על צמדים שטוח תחתן שלהם דומה לזה של צמדי ההתקן האמיתי, דבר
שהביא בעקיפין לחיסכון בחומר תרמואלקטרי.

דגם מסוג זה מופיע בציור 3, אחרי שלוש בתהליך ליטוש מטלורגי סטנדרטי עד
קבלת משטח חלק המכיל את מדכיבי החיבור.

סביבה הדגם כוללת גם את הגששים לדגימת המתח. גששים אלה הוכנו ממוטות טונגסטן
שחודרו בקצותיהם בתהליך המתואר בנספח 1. בציור 4 מופיע חוד כזה בתוך צילום
הדגם וסביבתו (כווריאציה של גשש יחיד).



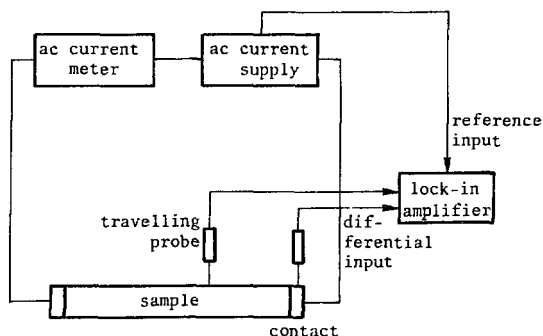
ציור 5 דגמים למדידה התנגדות מגע, בעלי גיאומטריה דומה לגיאומטריית ההתקן הממשי.



ציור 4 הדגם וסביבתו - גשש מנח, מוליכי הזרם ומיקרוסקופ.

3 המעגל האלקטרוני

ציור 5 מתאר סכימה עקרונית של העגל המדידה. מקור זרם מיוצב⁽²⁾, המבוסס על מחולל פונקציות, מספק לדגם זרם חילופין, דרך מעגל התאמת אימפדנסים אקטיבי. לקבלת יציבות נוספת, בעיקר בהפעלה לפרקי זמן ממושכים, שולב במעגל אלמנט קיזוז לטמפרטורה.

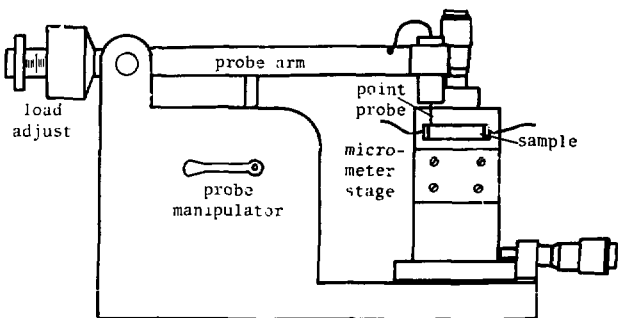


ציור 5
סכימה עקרונית למדידת
התנגדות מגע.

המתח המתפתח על הדגם הינו בהתאם להתפלגות ההתנגדות והוא נדגם בין שני גששים, אחד בתנועה ואחד בהנחה, כפי שהוסבר בפרק 1 ובציור 1. שני הגששים קרובים זה לזה עד כמה שאפשר כדי שהשינויים מנקודה לנקודה יימדדו ברגישות המרבית. מתח זה זה מוזן למכשיר lock-in amplifier מתוצרת Ortec Brookdeal דגם 9501 (סימון 3) דרך הכניסה הדיפרנציאלית של קדם המגבר שלו מדגם 5001. פעולת ה"נעילה" מתבטאת על-ידי מדידת אותות כאלה המסונכרנים עם אות ייחוס, המהווה העתק מדוייק, מבחינת התדירות, של אות המדידה, המוזן אף הוא למכשיר. שיטת מדידה זו עונה על דרישה (ב) שבמבוא (פרק 1).

4 המערכת המיכנית

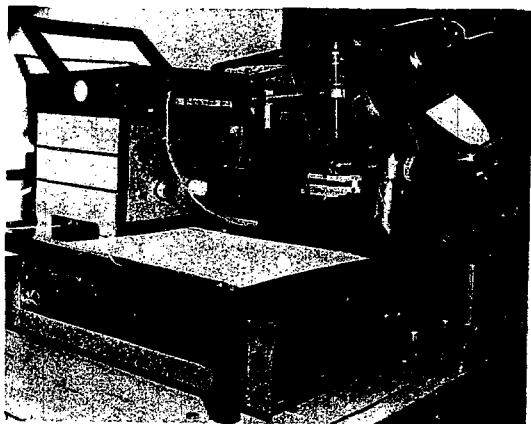
תפקיד החלק המיכני במכשיר הוא להביא את הדגם אל גשש המדידה במירווחים קצובים, ולבצע את המדידה על-ידי הורדת הגשש אל פני הדגם והיטתו לאחור מכן. מיקום הדגם נעשה על-ידי כמה מיקרומטרית תלת-צירית הניחזקת אל מחליק פלדה להזזות גסות בכיוון ציר x הבמה המיקרומטרית נאפשרת תזוזות של החל מ-0.01 מ"מ בכל היורו. הורדה הגשש לדגימת המבחן והרמתו נעשית על-ידי זרוע מאוזנת, ברומה לזרוע של טיפון, המופעלת על-ידי ידית מהצר. ציור 6 מתאר את המערכת המיכנית במבט מהצר.



ציור 6

הדגם והמערכת המיכנית במבט מהצר - תיאור סכימטי. הגשש הסטטי אינו מוצג כאן.

בציור 7 מופיע מכשיר המדידה בשלמותו.



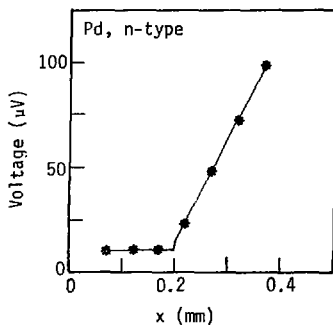
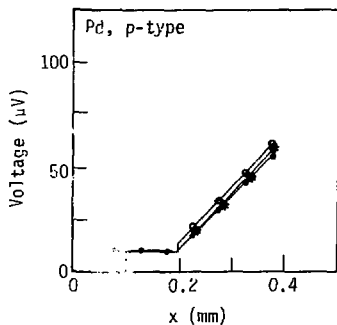
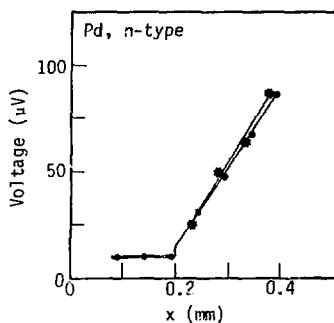
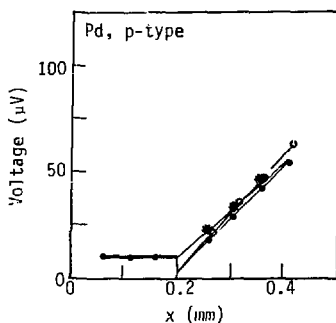
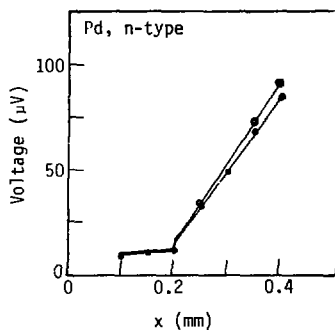
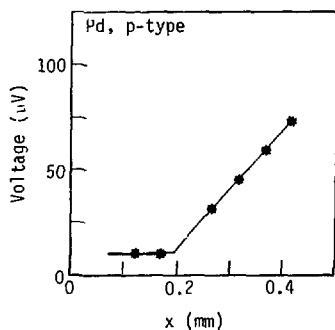
ציור 7

מכשיר המדידה בשלמותו.

5 מדידות

ניסוי ראשוני של המכשיר נעשה על-ידי מדידת התנגדותו של מוט נחושת עגול בקוטר 1.1 מ"מ. נקודות המדידה הותאמו לישר ושיפועו איפשר את חישוב ההתנגדות הסגולית של הרגם. ההתנגדות המדודה היתה שונה כפחות מ-2% מהערך המחושב, המבוסס על ערכים מטבלוח. מכאן הוחל במדידת התנגרות מגע שבין פלדיום לחומר תרמואלקטרי מסוג n ו-p וכן בין זהב לחומר התרמואלקטרי, שהיה מבוסס על ביסמות טלוריד ותוספות לשיפור תכונות.

תהליך המדידה החל במיקום הגשש הנח בנקורה כלשהי על החומר התרמואלקטרי, בדרך כלל במרחק של 5 נ"מ מקו הצומח. לאחר מכן הונח הגשש הנע על הפלדיום (או הזהב). במצב זה הופעל המעגל האלקטרוני שהוזן ררך מייצב מתח, והושאר למשך כחצי שעה להתייצבות. לאחר מכן בוצע כיוול ה-lock-in amplifier כהתאם להוראות היצרן והוחל בהסעת הגשש מהפלדיום (או הזהב) אל החומר התרמואלקטרי, בניצב למישור הצומח. בררך כלל בוצעו שלוש עד ארבע סריקות כאלה לכל רוחב הרגם. לזרם של 10 mA(ac) דרך הרגם התקבלו מתחים כחחוס של $50 \pm 500 \mu V$. נחובי המדידה, מיקום הצומח, שטח המגע והזרם הוכנסו למחשב שהתאים ושרטט קוויים ישרים לנקודות המדידה במתכת ובחומר התרמואלקטרי הוך הכאתם לתצורה (format) המקובלת כספרות: עלייה עם התרחקות מהצומח, בניגוד לחיבור המעשי שבצירור 1. מכאן חושבה מדרגת ההתנגדות וממנה התנגדות המגע הסגולית. בצירור 8 מופיעה ההצגה הגרפית של כמה תוצאות מדידה המתאימות לחיבורי פלדיום - ביסמות טלוריד מסוג n ו-p שנעשו כשיטת פולס החום⁽⁴⁾.



ציור 8 תיאור גרפי של סריקות פוטנציאל שנעשו במכשיר למדידת התנגרות מגע על צמתים אחדים של פלדיום - ביסמות טלוריר מסוג n-p (המצויים ב-x = 0.2 mm)

6 סיכום6.1 שגיאות הנובעות ממכשיר המדידה

6.1.1 המערכת האלקטרונית

מתוך המדידה על מוט הנחושת שנזכר לעיל מסתבר ששיפועי קווי הפוטנציאל על דגמים מסוג הנחושת מתקבלים בדיוק של 2%. מנתוני יצרן ה-lock-in amplifier עולה כי שינויי מתח הרשת או הטמפרטורה ($2:3^{\circ}\text{C}$) אינם יכולים לחולל שינוי הגדול מ-1%. מקור הזרם, מצד שני, פחות יציב ויש לצפות לשינויים של עד 5% תוך חצי שעה, ולכן, במהלך המדידות רושמים גם את נחון הזרם כרי לוודא כי לא חלו בו שינויים משמעותיים.

6.1.2 הסערכת המיכנית

דיוק מערכת זו תלוי בריוק הבמה המיקרומטרית וזרוע הגשש. במצב של ביטול חופש במסביב זרוע זו נראה כי אי-הדיוק במקום של המערכת המיכנית אינו עולה על 5%. מכל זה עולה כי אי-הדיוק של המערכת עצמה הינו לכל היותר כ-8%.

6.2 שגיאות הנובעות מאופי הדגמים

6.2.1 אי-דיוק נקודת הגישוש

מפאת התכונות המיכניות הירודות של חומריט המכוססים על ביסמות טלוריד, עלול גשש הטונגסטן לשקוע יתר על המידה בנקורות מסוימות ואף להיות מוסט על-ידי גרעין קשה, אל איזור נ"ך. מתוך מדידה מיקום נקורות הגישוש במקרוסקופ מטלורגי עולה כי סטיות של עד 10% אפשריות בקביעה מיקום נקודת הגישוש. נזכיר, כי תופעת המיצוע הנלווית למקרים אלה (של חדירה עמוקה של הגשש) איננה לרעה במקרה שלנו, כפי שנראה בסעיף 6.2.2.

6.2.2 אי-הומוגניות ואי-ליניאריות

אי-הומוגניות של החומר התרמואלקטרי ותופעות של שינוי שטח החתך כשמחברים אל איזור הצומת, עלולים לסבך את חיטוב התנגדות המגע בשל שיפועים משתנים של קווי

הפוטנציאל לאותו דגם ואי-הליניאריות שלו. תוצאות מדגמים כאלה טובות כנחון בסיסי בלבד, אולם בכדי לחשכ עדכים מוחלטים ומדוייקים יש לנתח את התוצאות בשיטות מורכבות יותר.

6.2.3 התפלגות זרם לא אחידה

תופעה זו עלולה לקרות בעיקר כרגמים מרסוג שנזכר כאן בשל ההיפוך בכיוון הזרם במעבר ממוט למוט, דבר הגורם לשינויי צפינות זרם מקומיים באיזורים הסמוכים לצומת. במקרה המיוחר שלנו, בו יחס ההתנגדות של המתכת לזו של המוליך למחצה הוא כ-1:1500, תופעה זו איננה בולטת. בכל מקרה, להקטנת השגיאות, הנובעות מאופי הדגם מבוצעות מספר טריקות, ומתוכן ניתן לדלות את התוצאות המייצגות.

6.2.4 השפעת שינויי טמפרטורה מקריים

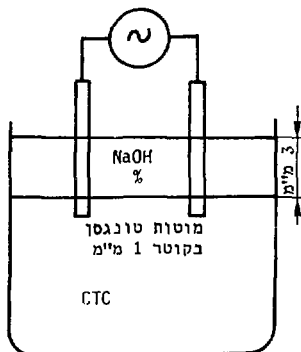
חומרים המבוססים על ביסמות טלוריר רגישים ביותר לשינויי טמפרטורה, ולכן יש לדאוג שהמדידה תתבצע חוך שינויי טמפרטורה מינימליים.

בשלב הזה של המדידות וברגמיט האלה נראה שאי-הדיוק של המכניר מגיע ל- $\pm 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$.

נספח 1 הכנת גשש טונגסטן

גשש הטונגסטן⁽⁵⁾ עשוי ממוט טונגסטן בקוטר 1 מ"מ שחורר בקצהו באופן הבא:

לתוך כלי זכוכית יוצקים אלקטרוליט, ונוזל אחר שהוא אינרטי יחסית אליו, במקרה זה יוצקים CTC ועליו שכבה של כ-3 מ"מ חמיסח NaOH בריכוז 10%. בתוך תערובת זו טובלים שני מוטות טונגסטן כך שקצותיהם ייטבלו בנוזל האינרטי (ראה ציור 1א).



ציור 1א
הכלי לליטוש
אלקטרוליטי.

בין שני המוטות מופעל מתח חילופין של כ-5 V. בתחילת הליטוש צריכת הזרם הינה 300±400 mA לשכבת אלקטרוליט של 3 מ"מ ומרחק 28 מ"מ בין המוטות. עם התקרמות הליטוש יורדת צריכת הזרם ומתקבל איזור ההולך ורק לקראת שכבת הגבול אלקטרוליט - CTC. כעבור 20:25 רקות נושרים חלקי המוט הטבולים ב-CTC. בשלב זה ממשיכים בליטוש זמן מה (מספר שניות) בכדי להקרות מעט את החורר ולהקנות לו בכך חוזק מיכני.

Referencesסימוכין

1. O. J. Mengali and M. R. Seiler, "Contact resistance studies on thermoelectric materials", *Adv. Energy Conv.* 2, 59-68 (1962).
2. מ' נחמרי, י' שילדקראוט, מ.רכת למדידת התנגדויות נמוכות, NRCN(IB)-023, תש"ט, 1979.
3. *Ortec Brookdeal 9501 Lock-in Amplifier - Instruction Manual*, Publication No. M9501-0, Ortec Brookdeal.
4. M. Lanxner, I. Shai, A. Brandstetter, and G. Yekutieli, "High reliability contacts for miniature thermoelectric converters", in *Proceedings of the 13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (San Diego, California, 20-26 August 1978)*, Publication IEEE 78-CH 1372-2 Energy, SAE P-75, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1978, Vol. 3, pp 1984-1988.
5. K. M. Bowkett and D. A. Smith, *Field-Ion Microscopy*, North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1970, pp 57-61, 221-224.

כהוצאת מה"ל - פרסומים