

פיתוח אלקטרודה ננופורוזיבית במבנה ליבה-קליפה עבור תאים סולריים מרוגשים בצבע

אריה צבן, ישי דיאמנט, סיגואנג צ'ן, אופירה מלמד, המחלקה לכימיה, אוניברסיטת בר-אילן, רמת-גן

תקציר

מאמר זה מתאר פיתוח אלקטרודה ננופורוזיבית במבנה ליבה-קליפה ושילובה בתא סולרי מרוגש בצבע. אלקטרודת הליבה-קליפה מורכבת ממוליך למחצה ננומטרי, TiO_2 , המכוסה בקליפה דקה של מוליך למחצה אחר, שאנרגיית פס ההולכה שלו שונה מזה של ה- TiO_2 . כאשר הליבה עשויה מ- Nb_2O_5 שפס ההולכה שלו שלילי מזה של ה- TiO_2 יוצרת הקליפה מחסום אנרגטי באינטרפייס שבין ה- TiO_2 לאלקטרוליט. מחסום זה מקטין את קצב תגובת הרקומבינציה בין האלקטרונים המוזרקים ל- TiO_2 לבין היונים או מולקולות הצבע המוחמצנים. השוואה בין שני תאים סולריים מרוגשים בצבע הנבדלים רק באלקטרודה הננופורוזיבית מראה שהתא הסולרי המכיל אלקטרודת ליבה-קליפה טוב יותר מהתא הרגיל ביחס לכל הפרמטרים המאפיינים תא סולרי. כתוצאה מכך, מתקבל שיפור של 35% ביעילות הכוללת של ניצולת הזרם מהאור.

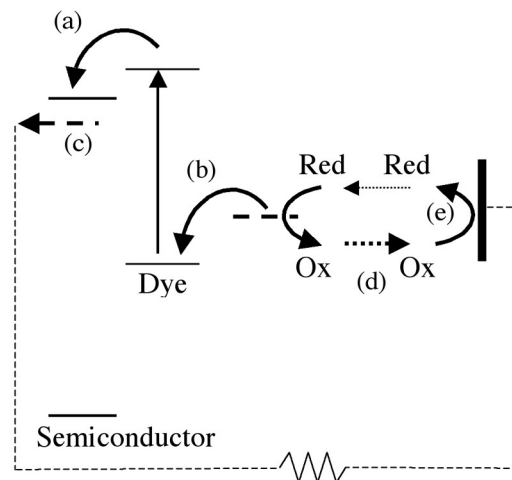
שבין שני מוליכים למחצה¹⁻³. תא זה מכיל מוליך למחצה אחד שמפתח הרמות שלו גדול כך שאינו בולע קרינה בתחום האור הנראה, וחומר צבע הספוח לפני השטח. לתא סולרי זה המכונה תא סולרי מרוגש בצבע (Dye sensitized solar cell) מספר יתרונות שהבולטים בהם הם מחירו הזול ושקיפותו. השקיפות מאפשרת פיתוח יישומים ייחודיים כגון חלונות סולריים או חלונות פוטואלקטרוכימיים המונעים מעצמם^{4,5}.

תיאור אנרגטי של התהליך הפוטו-וולטאי הבסיסי בתא הסולרי מרוגש הצבע מוצג באיור 1. בליעת אור על ידי מולקולת הצבע גורמת לערעור של אלקטרון המוזרק באופן מיידי למוליך למחצה אליו הוא קשור (1a). לאחר הזרקת האלקטרון למוליך למחצה, חומר הצבע חוזר למצבו הנייטרלי על ידי חימצון יונים במתווך אלקטרוליטי הנמצא במגע איתו (הזרקת חור למתווך) (1b). היות המוחמצן נע דרך המתווך אל האלקטרודה האחורית (1d) ואילו האלקטרון המוזרק נע דרך שכבת המוליך למחצה לכיוון המצע המוליך (1c), וממשיך במעגל חימוני אל האלקטרודה האחורית. באלקטרודה זו, נסגר המעגל החשמלי במפגש בין האלקטרון והיון המוחמצן שמתחזר למצבו המקורי.

התא הסולרי המתואר באיור 1 פועל ביעילות רק כאשר שטח הפנים של המוליך למחצה גדול מאוד. שטח הפנים הגדול נדרש מכיוון שמחד, הזרקת מטען יעילה מתרחשת רק מחומר צבע הספוח ישירות על גבי המוליך למחצה (שכבה חד מולקולרית) ומאידך, כמות האור הנבלעת על ידי שכבה חד מולקולרית הספוחה לאלקטרודה שטוחה, קטנה מאוד. ואכן, הדיווח הראשון על תא סולרי מרוגש בצבע יעיל, התאפשר בעקבות פיתוח האלקטרודה הננופורוזיבית על ידי O'Regan ו-Gratzel³. אלקטרודה זו מבוססת על חלקיקים ננומטריים של מוליך למחצה בעל מרווח רמות גדול המסונטרים על גבי מצע מוליך ושקוף. כפי שניתן לראות באיור 2, חלקיקי המוליך למחצה הננומטריים יוצרים שכבה נקבובית בעלת שטח פנים גדול. שטח פנים של אלקטרודה סטנדרטית בעובי $10 \mu m$ העשויה מחלקיקים בקוטר $20 nm$ גדול עד כדי פי 1000 משטח המצע המוקרן, כך שבליעת אור על ידי שכבה חד מולקולרית ספוחה נעשית משמעותית. חשוב לציין שהפרופורציות האמיתיות שונות מהמתוארות באיור 2, עובי שכבת המוליך למחצה קטן בכ- 3 סדרי גודל (כ- $10 \mu m$) בהשוואה לעובי המצע (כ- $3 cm$), וגודל החלקיקים קטן ב- 3 סדרי גודל מעובי השכבה.

מלבד המוליך למחצה וחומר הצבע, התא הסולרי מרוגש הצבע כולל גם מתווך אלקטרוליטי ואלקטרודה אחורית. בדרך כלל אלקטרודה זו מכילה שכבה דקה של פלטינה או פחם על גבי מצע מוליך. האלקטרודה האחורית מוצמדת בלחץ לאלקטרודה הקדמית כשהאלקטרוליט המכיל זוג חימצון/חיזור מוחדר על ידי כוחות קפילריים לנפח הפנוי באלקטרודה הננו-פורוזיבית. התאים היעילים הקיימים כיום מבוססים על אלקטרודה נקבובית העשויה TiO_2 ומצופה בחומר צבע

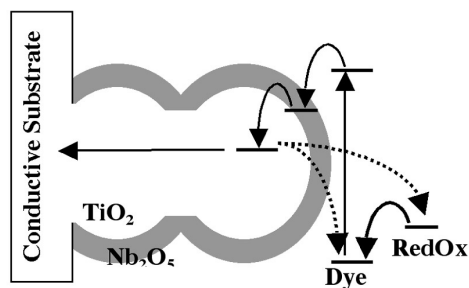
המרת אנרגיית שמש לאנרגיה חשמלית באופן יעיל וזול הינה אחד מהאתגרים החשובים העומדים בפני המדע בתקופה זו. ראוי לציין במיוחד את ההקשר הסביבתי של השימוש בתאים סולריים שמתחייב מזיהום האוויר ההולך וגובר. לאחרונה הובהר כי ללא פיתרון אנרגיה נקיה צפוי העולם להתחמם באופן משמעותי במאה הקרובה כשאחת התחזיות צופה עליה של 5 מעלות עד שנת 2050. מבקרי תחזית זו אינם כופרים בעיקרון אלא רק במידת ההתחממות, כך שברור שאנו מחויבים לפתח פתרונות זולים ויעילים מוקדם ככל האפשר. המחקר המובא בזאת קשור לסוג של תא סולרי השונה באופן בסיסי מהתאים הסטנדרטיים המבוססים על צומת ה-p-n



איור 1. תיאור אנרגטי של התהליכים המתרחשים בתא הסולרי מרוגש הצבע.

תנועתו יכול האלקטרון להגיב עם חומר צבע או יונים מחומצנים הנמצאים סביב החלקיקים בטווח ננומטרי כתוצאה מהמבנה הנקובי המאפשר את חדירת האלקטרוליט עד למצע. תגובה זו מכונה רקומבינציה והיא מהווה את הגורם העיקרי לאיבודי זרם בתא הסולרי מרוגש הצבע. חשוב לציין כי החלקיקים הננומטריים המרכיבים את האלקטרודה הננופורוזיבית, קטנים מכדי לאפשר כיפוף רמות בצומת אלקטרודה - אלקטרוליט כמקובל בתאים פוטואלקטרוכימיים בהם האלקטרודה הקדמית קומפקטית. השדה החשמלי הקשור בכיפוף רמות מאט את תהליך הרקומבינציה על ידי הרחקת אלקטרון מהאינטרפייס עם התווך המכיל את החור כך שמבחינת תהליכי הרקומבינציה בתא מרוגש הצבע חסרונם משמעותי.

מטרת המחקר המובא כאן הייתה ליצור מחסום אנרגטי בפני השטח של חלקיקי המוליך למחצה על מנת למנוע את תהליך הרקומבינציה. המחסום התבסס על שכבה דקה של מוליך למחצה נוסף שפס ההולכה שלו גבוה (שלילי) מזה של המוליך למחצה העיקרי. באופן מעשי, מדובר בשכבה דקה של Nb_2O_5 בעל פס הולכה הגבוה 100 mV מזה של ה- TiO_2 . נוכחות ה- Nb_2O_5 בפני השטח של חלקיקי ה- TiO_2 יוצרת מדרגת פוטנציאל באינטרפייס שבין ה- TiO_2 לאלקטרוליט כפי שמוצג



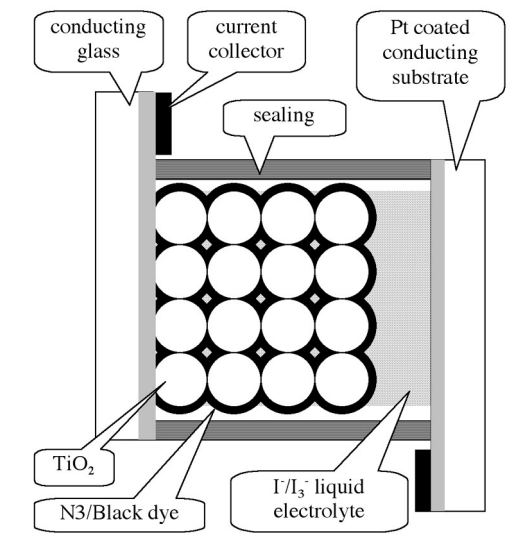
איור 3. מבנה אלקטרודת ליבה-קליפה. ההפרש בין פס ההולכה של קליפת ה- Nb_2O_5 לפס ההולכה של מצע ה- TiO_2 יוצר מחסום אנרגטי המונע מהאלקטרונים הנעים ב- TiO_2 להגיב עם היונים שבתמיסה או עם חומר הצבע המחומצן.

באיור 3. כתוצאה מכך, אלקטרון שהוזרק מחומר הצבע עובר לפס ההולכה החיובי יותר של ה- TiO_2 , שם הוא נע מוקף בקליפה של Nb_2O_5 המונעת ממנו להגיב עם התמיסה. חשוב להדגיש שבמבנה ליבה-קליפה זה יש לחבר את חלקיקי הליבה זה לזה (בתהליך סינטור), לפני העטיפה בקליפה החיצונית. אחרת, נוצר מחסום אנרגטי בין חלקיק לחלקיק וכתוצאה מכך ההתנגדות לתנועת האלקטרון לכיוון המצע גדלה.

על מנת להשוות בין יעילות האלקטרודה במבנה ליבה-קליפה ליעילות האלקטרודה הרגילה, הוכנה אלקטרודת TiO_2 אחת שחולקה לשני חצאים זהים. אחד החצאים צופה בשכבה דקה של Nb_2O_5 ואילו החצי השני שימש כאלקטרודת הייחוס.

המורכב מקומפלקס רותיניום המכונה $N3$ (ראה "המערכת הניסויית"). המתווכים האלקטרוליטים מורכבים בדרך כלל מממסים אפרוטיים המכילים I^-/I_3^- כצמד חימצון/חיזור. לשמירת שקיפות התא עשויה בדרך כלל האלקטרודה האחורית מזכוכית מוליכה המצופה בשכבה קטליטית דקה של פלטינה. חלק ניכר מהמחקר הקשור בתא הסולרי מרוגש הצבע מתרכז בהחלפה של מרכיבי התא השונים במרכיבים שיאפשרו יעילות גבוהה יותר. לדוגמה, נבדקה החלפה של המוליך למחצה TiO_2 בחומרים אחרים כגון: ZnO , Nb_2O_5 , $SrTiO_3$.⁹ חומרי צבע שונים, אורגניים^{10,11} ואי אורגניים¹²⁻¹⁴, נבחנו, ונעשה ניסיון להחליף את האלקטרוליט הנוזלי במוליך יוני מוצק כמו פולימר או מלח מותך^{15,16}. מתווך מוצק יקל מאוד על ייצור התא ועל יישום של התא בתנאי טמפרטורה קיצוניים.

מחקרים אחרים עוסקים בהבנת התהליכים המתרחשים בתא מקור הפוטו-מתח בתא הסולרי¹⁷⁻²⁰, מנגנון תנועת האלקטרון בתוך המוליך למחצה עד למצע (תחת השפעת שדה חשמלי או גרדיאנט ריכוזים)²¹, מיקום רמות האנרגיה בצומת מוליך למחצה/חומר צבע/אלקטרוליט²², פילוג המתח באלקטרודה הקדמית^{20,23} ועוד.



איור 2. מבנה התא הסולרי מרוגש הצבע. מרכיבי התא כוללים: אלקטרודה ננופורוזיבית, חומר צבע, מתווך אלקטרוליטי ואלקטרודה אחורית.

מאמר זה מתרכז באחד מהתהליכים המרכזיים בתא מרוגש הצבע - תהליך הרקומבינציה. האלקטרון המוזרק למוליך למחצה נחשב יעיל מבחינה פוטו-וולטאית רק אם יצליח להגיע למצע המוליך (תנועה לאורך מספר מיקרומטרים). במהלך

של ה- TiO_2 דבר המוביל למתח גבוה יותר בתנאי נתק. הכוח שמקורו במכפלת הזרם במתח גדל ממילא.

טבלה 1

	Pmax mW/cm ²	Voc mv	Jsc mA/cm ²	FF %
TiO ₂	3.45	659	10.2	51.1
TiO ₂ /Nb ₂ O ₅	4.70	723	11.4	56.4

בנוסף לתלות זרם-מתח נעשו מדידות נוספות שהוכיחו את קיום המחסום האנרגטי. מדידות אלו מתוארות כאן בקצרה. (הסבר מלא ופירוט התוצאות ניתן למצוא ברפרנסים 24,25).
1. ספקטרו-אלקטרוכימיה: מדידה ספקטרלית של כמות האלקטרונים הנצברת באלקטרודה תחת מתח חיצוני ובתנאי חושך הראתה כי באלקטרודת ליבה-קליפה נצברת כמות גדולה יותר של אלקטרונים במתח נתון. הצבירה המוגברת מיוחסת למחסום האנרגטי בפני השטח.

2. תלות הזרם במתח של אלקטרודה ננופורוזיבית בתנאי התא הסולרי ללא הארה. המתח המופעל בתנאי חושך מאלץ זרם שכיוונו מהמצע אל התמיסה. זרם זה מדמה במידה מסוימת את זרם הרקומבינציה. לכן, זרם החושך הנמוך שהתקבל באלקטרודת הליבה-קליפה בהשוואה לזרם החושך שהתקבל מהאלקטרודה הרגילה מעיד על הקטנת קצב הרקומבינציה.
3. דיסורבציה אלקטרוכימית: ניתוק חומר הצבע מהאלקטרודה בהפעלת מתח מאפשר לאפיין את פילוג המתח לרוחב האלקטרודה. נמצא כי נוכחות הקליפה גוררת פיזור אחיד יותר של הפוטנציאל המופעל על האלקטרודה. תופעה זו יוחסה למחסום האנרגטי שמאפשר צבירת אלקטרונים בפס ההולכה לפני התגובה עם התמיסה.

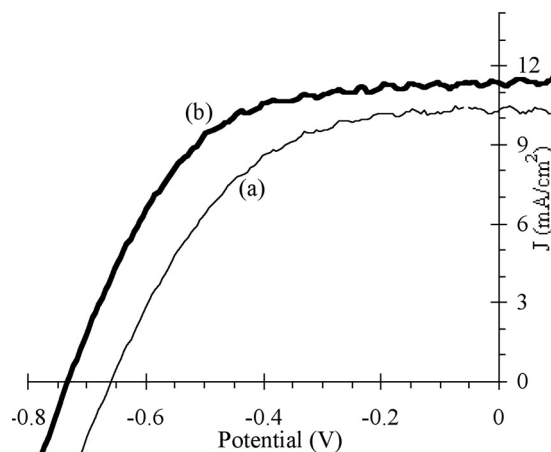
בנוסף למדידות אלו המוכיחות את קיום המחסום האנרגטי, נבדקה יעילות יצירת הפוטו-זרם כפונקציה של אורך הגל המוקרן. מדידה זו שבה התקבלה יעילות גבוהה בכל אורכי הגל מוכיחה את עליונות האלקטרודה ליבה-קליפה על האלקטרודה הרגילה.

לסיכום, השוואה של שני תאים סולריים מרוגשים בצבע השונים רק באלקטרודה הקדמית מראה שהתא הסולרי המבוסס על אלקטרודה במבנה ליבה-קליפה טוב יותר מהתא הרגיל ביחס לכל הפרמטרים המאפיינים תא סולרי. כתוצאה מכך, מתקבל שיפור של 35% ביעילות הכוללת של ניצולת הזרם מהאור.

פרוט הניסויים וכן השוואה למערכות ליבה-קליפה נוספות ניתן למצוא ברפרנסים הבאים:

24,25, למערכת $\text{TiO}_2/\text{Nb}_2\text{O}_5$, 26 למערכת $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$, 27 למערכת $\text{TiO}_2/\text{SrTiO}_3$, 28 למערכת TiO_2/ZnO .

היות והקליפה נקשרת לליבה בתהליך סינטור נוסף, סונטרה גם אלקטרודת הייחוס פעם נוספת על מנת להשוות את תנאי הניסוי לחלוטין ולבדוק את השפעת הקליפה בלבד.



איור 4. תלות זרם-מתח של תאים סולריים המכילים את (a) אלקטרודת הייחוס TiO_2 בלבד. (b) אלקטרודת ליבה-קליפה בה מצע ה- TiO_2 המכוסה בקליפת ה- Nb_2O_5 .

העקומות המוצגות באיור 4 מתארות את תלות הזרם במתח של התאים שהכילו את שתי האלקטרודות בתנאי תאורה המקבילים לאור שמש סטנדרטי. העקומה מאופיינת ב: "זרם קצר" (J_{sc}), "מתח נתק" (V_{oc}) ונקודת מקסימום כוח (P_{max}). "זרם קצר" הוא הזרם שמייצר תא המואר באור שמש סטנדרטי ללא התנגדות במעגל החיצוני (שני צידי התא מקוצרים). "מתח נתק" הוא המתח המיוצר בתא מואר כשאין זרימת זרם במעגל החיצוני (שני צידי התא מנותקים). בנקודת המקסימום כוח מתקבל ההספק המקסימלי של התא. השוואה בין הפרמטרים המאפיינים של תא סולרי עבור התאים שהכילו את אלקטרודת הליבה-קליפה והאלקטרודה הרגילה מוצגים בטבלה 1. כפי שניתן לראות בטבלה, הזרם גדל מ- 10.2 mA/cm^2 באלקטרודה הרגילה ל- 11.4 mA/cm^2 באלקטרודת הליבה-קליפה, המתח מ- 659 mV ל- 723 mV וההספק מ- 3.45 mW/cm^2 ל- 4.70 mW/cm^2 . פרמטר נוסף המגדיר את יעילות התא, הנקרא fill factor, מציין את יחס ההספק המקסימלי שהתקבל מהתא להספק המקסימלי התיאורטי. גודל זה מבטא בדרך כלל התנגדויות פנימיות בתוך התא. עם המעבר לאלקטרודת ליבה-קליפה גדל ה fill factor מ-51.1% ל-56.4%.

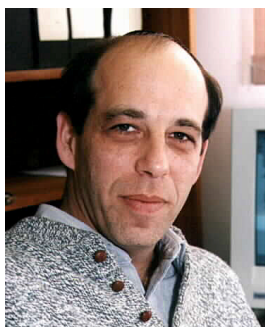
ניתן להסביר את העליה ב"זרם הקצר" בחסימת הרקומבינציה על ידי המחסום האנרגטי. חסימה זו מאפשרת למספר גדול יותר של אלקטרונים להגיע למצע, במקום להגיב עם יונים מחומצנים או מולקולות צבע. באופן דומה מאפשר המחסום האנרגטי צבירת מספר רב יותר של אלקטרונים בפס ההולכה

מקורות

1. M. Gratzel, Prog Photovoltaics 8, 17 (2000)
2. M. Gratzel, Curr Opin Colloid Interface S 4, 314 (1999)
3. B. Oregan and M. Gratzel, Nature 353, 737 (1991)
4. F. Pichot, S. Ferrere, R. J. Pitts, and B. A. Gregg, J Electrochem Soc 146, 4324 (1999)
5. L. Vayssieres, Y. Alfredsson, and H. Siegbahn, Electrochem Solid State Lett 2, 648 (1999)
6. S. Chappel and A. Zaban, Solar Energ Mater Solar Cells 71, 141 (2002)
7. K. Keis, E. Magnusson, H. Lindstrom, S. E. Lindquist, and A. Hagfeldt, Solar Energ Mater Solar Cells 73, 51 (2002)
8. K. Sayama, H. Sugihara, and H. Arakawa, Chem Mater 10, 3825 (1998)
9. S. Burnside, J. E. Moser, K. Brooks, M. Gratzel, and D. Cahen, J Phys Chem B 103, 9328 (1999)
10. K. Sayama, M. Sugino, H. Sugihara, Y. Abe, and H. Arakawa, Chem Lett, 753 (1998)
11. E. Stathatos, P. Lianos, A. Laschewsky, O. Ouari, and P. Van Cleuvenbergen, Chem Mater 13, 3888 (2001)
12. S. Ferrere and B. A. Gregg, J Amer Chem Soc 120, 843 (1998)
13. G. Sauve, M. E. Cass, G. Coia, S. J. Doig, I. Lauermann, K. E. Pomykal, and N. S. Lewis, J Phys Chem B 104, 6821 (2000)
14. M. Yanagida, L. P. Singh, K. Sayama, K. Hara, R. Katoh, A. Islam, H. Sugihara, H. Arakawa, M. K. Nazeeruddin, and M. Gratzel, J Chem Soc Dalton Trans, 2817 (2000)
15. A. F. Nogueira, J. R. Durrant, and M. A. De Paoli, Advan Mater 13, 826 (2001)
16. E. Stathatos, P. Lianos, U. Lavrencic-Stangar, and B. Orel, Advan Mater 14, 354 (2002)
17. D. Cahen, G. Hodes, M. Gratzel, J. F. Guillemoles, and I. Riess, J Phys Chem B 104, 2053 (2000)
18. J. Ferber and J. Luther, J Phys Chem B 105, 4895 (2001)
19. F. Pichot and B. A. Gregg, J Phys Chem B 104, 6 (2000)
20. M. Turrion, B. Macht, H. Tributsch, and P. Salvador, J Phys Chem B 105, 9732 (2001)
21. D. Vanmaekelbergh and P. E. de Jongh,

המערכת הניסויית

תרחיף של ננוקריסטלי TiO_2 הוכנה בשיטה הידרותרמית. תהליך ההכנה כלל הידרוליזה של חומר המוצא, טיטניום טטראאיזופרופוקסיד ($\text{Ti(isopropoxide)}_4$), בתמיסה של חומצה אצטית (pH 2). לאחר ערבוב במשך לילה, התמיסה נודפה ב 82°C לסילוק הליגנדות האורגניות. בשלב האחרון בוצע הטיפול ההידותרמי המוביל ליצירת הננוקריסטלים. התמיסה הועברה לתא לחץ וחוממה לטמפרטורה של 250°C במשך 13 שעות. התרחיף הסופי שהכיל גבישי TiO_2 בגודל 23 nm נמרח על זכוכית מוליכה (F-doped SnO_2) על ידי מקל זכוכית. לאחר ייבוש השכבה, סונטרה האלקטרודה באוויר בטמפרטורה של 450°C במשך 30 דקות. לאחר הסינטור, חולקה האלקטרודה לשני חצאים. חצי אחד צופה בקליפת ה Nb_2O_5 על ידי טבילה בתמיסה המכילה חומר מוצא של ניאוביום (נחקרו 3 חומרי מוצא: $\text{Nb(isopropoxide)}_5$, Nb(ethoxide)_5 , NbCl_5) וסינטור ב 500°C במשך 30 דקות. על מנת לשמור על תנאי הכנה זהים בין האלקטרודה הרגילה לאלקטרודת ליבה-קליפה, החצי שלא כוסה ב Nb_2O_5 סונטר אף הוא עם החצי המכוסה. עובי שכבת ה Nb_2O_5 חושב ממדידות XPS הנותנות את הכמות היחסית של מרכיבי האלקטרודה. בהנחה שחלקיקי ה TiO_2 כדוריים וכיסוי ה Nb_2O_5 הומוגני, עובי השכבה המחושב מיחס האטומים Ti ל Nb , הינו 2-3 ננומטר. מדידת כמות אטומי Nb לאחר גילוף של מספר שכבות דקות מהפילם מראה כי חלקיקי ה TiO_2 מכוסים ב Nb_2O_5 לכל עומק הפילם (עד למצע). חומר הצבע, $\text{cis-di(thiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl)-4,4'-dicarboxylate}$, ruthenium (II) המכונה N3 , נקשר לאלקטרודה על ידי טבילה בתמיסת אתנול יבש המכילה 0.5 mM חומר צבע. על מנת להמנע מספיחת מים על האלקטרודה, האלקטרודות חוממו ל 150°C ואחר כך קוררו ל 80°C לפני הטבילה בתמיסת חומר הצבע. האלקטרודות נשמרו בתמיסה עד למדידות. מדידות תא סולרי נעשו במבנה סנדוויץ'. במבנה זה האלקטרודה האחורית, פלטינה המנודפת על זכוכית מוליכה (F-doped SnO_2), נלחצה על גבי האלקטרודה הקדמית. האלקטרוליט, $0.5\text{ M LiI}/0.05\text{ M I}_2$ in 1:1 acetonitrile-NMO (3-methyl-2-oxazolidinone) שהוזרק בין האלקטרודות וחדר עד למצע עקב הכוחות הקפילריים. מנורת קסנון בעלת ספקטרום קרינה הדומה לספקטרום השמש שכוילה לדמות עוצמת שמש בתחום הנראה שימשה להקרנת התא הסולרי.



ד"ר אריה צבן

יליד ישראל (1961) החל לימודיו לתואר ראשון בשנת 1987 לאחר 7 שנות שרות צבאי. סיים תואר ראשון בכימיה (בהצטיינות) בשנת 1990 ותואר שלישי באלקטרוכימיה (בהצטיינות) בהדרכת פרופ' דורון אורבך בשנת 1995. לאחר שנתיים של פוסטדוקטורט בתחומי הפוטואלקטרוכימיה ומדע החומרים (NREL - National Renewable Energy Laboratory) ארה"ב, הצטרף כמרצה בכיר למחלקה לכימיה באוניברסיטת בר-אילן. פרסם למעלה מ-50 מאמרים ושלושה פטנטים. השנה זכה בפרס המדען הצעיר המצטיין של החברה הישראלית לכימיה בהמשך לזכייה במספר פרסים ומלגות בהם, פרס מחקר ע"ש מיכאל לנדאו, מלגת רוטשילד, ומלגת לוי אשכול של משרד המדע.

- J Phys Chem B 103, 747 (1999)
22. A. Zaban, S. Ferrere, and B. A. Gregg, J Phys Chem B 102, 452 (1998)
23. A. Zaban, A. Meier, and B. A. Gregg, J Phys Chem B 101, 7985 (1997)
24. A. Zaban, S. G. Chen, S. Chappel, and B. A. Gregg, Chemical Communications, 2231-2232 (2000)
25. S. G. Chen, S. Chappel, Y. Diamant, and A. Zaban, Chem Mater 13, 4629 (2001)
26. S. Chappel, S. G. Chen, and A. Zaban, Langmuir 18, 3336 (2002)
27. Y. Diamant, S. G. Chen, and A. Zaban, in press.
28. Y. Diamant, S. G. Chen, and A. Zaban, in press.