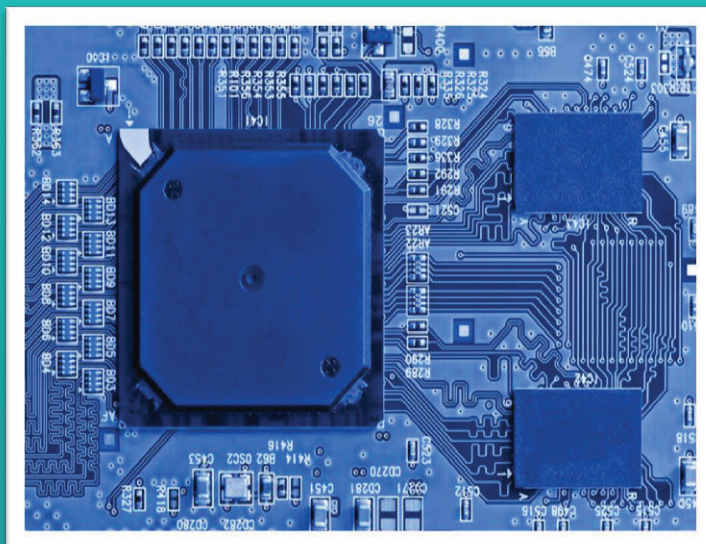




תעשיית המיקרואלקטרוניקה בראי אתגרים גלובליים לתעשיות המים דו"ח חמישי סקר ואתגרים



ד"ר גלעד פורטונה
שירי פרוינד-קורן



אודות מוסד שמואל נאמן

מוסד שמואל נאמן שהוקם בטכניון בשנת 1978 ביוזמת מר שמואל (סס) נאמן והוא פועל להטמעת חזונו לקידומה המדעי-טכנולוגי, כלכלי וחברתי של מדינת ישראל.

מוסד שמואל נאמן הוא מכון מחקר המתמקד בהתווית מדיניות לאומית בנושאי מדע וטכנולוגיה, תעשייה, חינוך והשכלה גבוהה, תשתיות פיסיות, סביבה ואנרגיה ובנושאים נוספים בעלי חשיבות לחוסנה הלאומי של ישראל בהם המוסד תורם תרומה ייחודית. במוסד מבוצעים מחקרי מדיניות וסקירות, שמסקנותיהם והמלצותיהם משמשים את מקבלי החלטות במשק על רבדיו השונים. מחקרי המדיניות נעשים בידי צוותים נבחרים מהאקדמיה, מהטכניון ומוסדות אחרים ומהתעשייה. לצוותים נבחרים האנשים המתאימים, בעלי כישורים והישגים מוכרים במקצועם. במקרים רבים העבודה נעשית תוך שיתוף פעולה עם משרדים ממשלתיים ובמקרים אחרים היוזמה באה ממוסד שמואל נאמן וללא שיתוף ישיר של משרד ממשלתי. בנושאי התוויית מדיניות לאומית שעניינה מדע, טכנולוגיה והשכלה גבוהה נחשב מוסד שמואל נאמן כמוסד למחקרי מדיניות המוביל בישראל.

עד כה ביצע מוסד שמואל נאמן מאות מחקרי מדיניות וסקירות המשמשים מקבלי החלטות ואנשי מקצוע במשק ובממשל. סקירת הפרויקטים השונים שבוצעו במוסד מוצגת באתר האינטרנט של המוסד. בנוסף מוסד שמואל נאמן מסייע בפרויקטים לאומיים דוגמת המאגדים של משרד התמי"ס - מגנ"ט בתחומים: ננוטכנולוגיות, תקשורת, אופטיקה, רפואה, כימיה, אנרגיה, איכות סביבה ופרויקטים אחרים בעלי חשיבות חברתית לאומית. מוסד שמואל נאמן מארגן גם ימי עיון מקיפים בתחומי העניין אותם הוא מוביל.

יו"ר מוסד שמואל נאמן הוא פרופ' זאב תדמור וכמנכ"ל מכהן פרופ' עמרי רנד.

כתובת המוסד: מוסד שמואל נאמן, קרית הטכניון, חיפה 32000

טלפון: 04-8292329, פקס: 04-8120273

כתובת דוא"ל: info@neaman.org.il

כתובת אתר האינטרנט: www.neaman.org.il

תעשיית המיקרוואלקטרוניקה

בראי אתגרים גלובליים

לתעשיות המים

דו"ח חמישי

סקר ואתגרים

ד"ר גלעד פורטונה

שירי פרוינד-קורן

אוגוסט 2013

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממוסד שמואל נאמן מלבד לצורך ציטוט של קטעים קצרים במאמרי סקירה ופרסומים דומים תוך ציון מפורש של המקור.

הדעות והמסקנות המובאות בפרסום זה הן על דעת המחברים ואינן משקפות בהכרח את דעת מוסד שמואל נאמן

רשימת יועצים

ניר סהר מנכ"ל איגוד ערים לשמירת איכות הסביבה (שרון-כרמל), יועץ טכני לכלל הסקטורים

פרופ' רפי סמיט - הפקולטה להנדסה כימית, הטכניון

אלה אופנברגר - המכון למחקר המים ע"ש גרנד, הטכניון

ארנון גולדפרב - Israel Cleantech Ventures

אריאלה גרינברג - Israel Cleantech Ventures

מיכאל לוריא - TowerJazz

טלי סורסקי - TowerJazz

אילן שמיר - Intel

אלי קורין - Annapurna Labs

מנהל הפרויקט : ד"ר גלעד פורטונה

עוזרת מחקר : שירי פרוינד-קורן

תוכן עניינים

	סיכום מנהלים	
1	תקציר	.1
3	הקדמה	.2
3	תעשיית המיקרואלקטרוניקה	2.1
4	תעשיית ייצור שבב	2.2
6	רגולציה	.3
7	טכנולוגיות טיפול בדגש על מהלך המים	.4
7	דיאגרמת מהלך המים בתעשיית ייצור שבבי המל"מ (מוליכים למחצה)	4.1
8	מים מוזנים	4.2
12	שפכי תהליך ייצור השבבים	4.3
14	מחזור והשבה	4.4
16	אתגרים לתעשיית המים	.5
16	שיפורים חיוניים של בעיות לא פתורות או שיפור למטרת התייעלות כלכלית	5.1
16	התמודדות עם צרכים חדשים בסקטור כתוצאה מהזדמנויות חדשות	5.2
17	סביבה ורגולציה	5.3
18	נתונים ואתגרים ממוקדי גאוגרפיה – המבט למזרח	5.4

רשימת תרשימים ודיאגרמות

- 7 תרשים 1 : דיאגרמת מהלך המים בתעשיית ייצור שבבי מל"מ
- 13 תרשים 2 : הפרדת זרמים במפעל Tower Semiconductors

סיכום מנהלים

פרויקט זה נערך במוסד שמואל נאמן, בשיתוף Israel New-Tech במשרד הכלכלה והמכון לייצוא ולשיתוף פעולה בינ"ל, כחלק מהמאמץ הלאומי לקידום תעשיית המים בסקטור התעשייתי הגלובלי.

במסגרת דו"ח זה נסקר מהלך המים בתהליך ייצור וויפרים (Wafers) ומיקרו שבבים (Microchips) בתעשיית המיקרואלקטרוניקה.

בדו"ח מובאים תקנים רלוונטיים וסקירה קצרה בנושא הפיזור הגאוגרפי של תעשיית המיקרואלקטרוניקה בעולם.

בתהליך הכנת הדו"ח נחקרו תהליכי הכנת המים המוזנים לתהליך – (Ultra pure water UPW), שלבי ייצור השבב, הרכב המים היוצאים מהתהליך והטיפולים האפשריים במי התהליך.

אותרו אתגרים טכנולוגיים הנוגעים לטיפול וניהול המים בתהליך, הנובעים מהתקדמות בתהליכי הייצור עצמם ומהשינויים ברגולציה העולמית.

האתגרים העיקריים נובעים בעיקר מהקטנה מתמשכת בממדי השבב והגדלת כמות המידע על כל שבב. יש צורך באיתור, זיהוי והוצאה של חלקיקים ותרכובות אורגניות ספציפיים בגדלים הולכים וקטנים. אתגר חשוב נוסף נובע מהצורך והשאיפה להגדלת אחוזי ההשבה בתהליך, בז ובד עם החמרת התקנים בנושא הרכב השפכים המטופלים.

דו"ח זה סוקר את תעשיית המיקרואלקטרוניקה עם דגש על מפעלי פבריקציה (פבים – fabs) לייצור שבבים וויפרים (Micro chips and wafers). כל זאת במטרה לאתר את תפקיד המים בתהליכי הייצור וצרכי הטיפול במים, מבחינת ניקיון המים המוזנים, שימוש יעיל וחסכוני במים, השבה, מחזור ושחרור מורשה לסביבה.

זהו דו"ח חמישי במסגרת סקירת שימושי המים בשישה סקטורים תעשייתיים גלובליים בהמשך לדו"ח הראשון שסקר את תעשיית הפקת הנפט והגזⁱ, הדו"ח השני שסקר את תעשיית המכרותⁱⁱ, הדו"ח השלישי שסקר את תעשיית ייצור התרופותⁱⁱⁱ והדו"ח הרביעי שסקר את תעשיית המזון והמשקאות^{iv}.

העבודה נעשתה במטרה להעמיק את ההבנה של תפקיד המים בתעשיות הגלובליות שנבחרו, ולזהות אתגרים עסקיים ארוכי טווח, מתוך רצון לקדם הזדמנויות עסקיות עבור חברות המים הישראליות.

עבודה זו תהווה בסיס חשוב לתוכניות העבודה של Israel NewTech, מכון היצוא ומערך הנספחים המסחריים בשנים הקרובות.

העבודה מתמקדת בלימוד תעשיית ייצור המיקרו שבבים, תוך סקירת תהליכים עיקריים, תפקיד המים בתהליכים אלה וזיהוי אתגרים בשימושי המים.

בפרק 2 אנו סוקרים את תעשיית המיקרואלקטרוניקה, בפרק 3 סוקרים את הרגולציה, בפרק 4 מציגים את הטכנולוגיות העיקריות המשמשות בתחום המים בתעשייה זו ובפרק 5 מרוכזים האתגרים העיקריים שזיהינו לשיפורים חיוניים ולחדשנות ע"י תעשיות המים.

סקטור המיקרואלקטרוניקה רגיש מאוד לנושא Brand Name ומתוך כך, לעמידה בסטנדרטים של קיימות – זיהום סביבתי, יחס מ"ק מים ליחידת מוצר, צריכת אנרגיה וטביעת רגל פחמנית.

מסמך זה מהווה שלב ראשון, שמטרתו סקירת הסקטור התעשייתי והצבת האתגרים לתעשיית המים הישראלית, במקביל אנו פונים לחברות רלוונטיות מתעשיית המים הישראלית, ובשלב הסופי נציג יעדים גלובליים לשיתוף פעולה (חברות הנדסה ומים בין-לאומיות) וכן חברות עסקיות שמהוות את לקוחות היעד הסופיים איתן מומלץ להתקשר ליצירת שיתופי פעולה בפתרון אתגרים אלה.

סקר על מחקרים בתחום המים באוניברסיטאות בארץ, נערך במקביל ובאמצעותו ננסה להאיר מקומות בהם מחקרים מדעיים אקדמיים עשויים לתת פתרונות חדשניים בטווח הארוך אותם התעשייה תוכל ליישם לשימוש מסחרי.

להלן ריכוז האתגרים לתעשיית המים הישראלית בסקטור ייצור השבבים כפי שזוהו במהלך הכנת המסמך:

שיפורים חיוניים של בעיות לא פתורות או שיפור למטרת התייעלות כלכלית:

- פיתוח ושכלול ציוד חדשני לייצור UPW המסוגל להבטיח רמת אמינות (Reliability) גבוהה יותר מן הציוד הקיים ומכאן – רווחיות גדולה יותר של התהליך.
- בתהליך הייצור המורכב של השבבים יש צורך באוטומציה מרבית של התהליך, ומכאן גם בניטור ובקרה של המערכות הפועלות.

התמודדות עם צרכים חדשים בסקטור כתוצאה מהזדמנויות חדשות:

- אתגרים שעולים מתהליך מתמשך של הקטנת רוחב התעלה בשבבים המיוצרים:
 - איתור וזיהוי סוג וריכוז חלקיקים - Killer Particles
 - איתור וזיהוי סוג וריכוז כימיקלים - Critical Organics
 - הוצאתם מהמים המוזנים
- פיתוח ושכלול ממברנות HF (Hollow Fiber) כתחליף לשימוש בכימיקליים פלואוקולנטים, במטרה להעלות את יעילות תהליך ניקוי המים המוזנים ואת כדאיותו הכלכלית.

סביבה ורגולציה:

- פיתוח ושכלול מערכות ל-ZLD (Zero Liquid Discharge), יעילות מבחינת צריכת האנרגיה וכדאיות כלכלית.
- הגדלת יכולות ההשבה לתשתיות ואף לתהליך עצמו באמצעות שכלול תהליכי הטיפול בשפכי התהליך.

2.1 תעשיית המיקרואלקטרוניקה

תעשיית המיקרואלקטרוניקה היא תעשייה הנמצאת בתהליך גידול מהיר ומתמשך.

בין המוצרים המיוצרים בתעשייה זו ניתן למנות מיקרו שבבים (שבבי מחשב), תאים סולריים ומסכי תצוגה שטוחים (Flat Panel Display). השבבים מיוצרים באתרים שנקראים מפעלי פבריקציה (Fabrication Plants), או בקיצור – פבים (Fabs). חברות העוסקות בתכנון ופיתוח שבבים נקראות Fabless וחברות המייצרות שבבים נקראות Foundry. לחברות כמו אינטל, יש גם אתרי תכנון ופיתוח וגם פבים.

לצורך ייצור מוצרים אלה דרושות כמויות גדולות של מים, כאשר אחוז ניכר ממים אלה, נדרשים בדרגת הניקיון הגבוהה ביותר – UPW (Ultra Pure Water). זרמי השפכים של תהליך הייצור הם מורכבים ומכילים רכיבים רעילים כגון חומצות שונות ומתכות, רכיבים המכתיבים טיפול ספציפי בשפכים לפני שחרורם.

בדו"ח זה נתמקד בתת-הסקטור הכולל ייצור שבבים ווויפרים (Wafers) מוליכים למחצה כגון מיקרו-מעבדים, שבבי זיכרון ומעבדי אותות דיגיטליים (Digital Signal Processors). סקטור המוליכים למחצה מהווה את הנתח הגדול ביותר בסקטור המיקרו אלקטרוניקה – גודל השוק נאמד בכ-325 מיליארד \$ ב-2011. תעשיית המוליכים למחצה צורכת את המים באיכות הגבוהה ביותר ומכאן שיש בה שימוש בכמויות גדולות של מים שפירים ליצור מים UPW אלה, ומכאן - צורך בטיפול מים מקדימים בדרגה הגבוהה ביותר.

סוגי שבבים

תהליך ייצור שבב סיליקון צורך כמויות גדולות של מים, הנדרשות לניקוי ושטיפה במהלך הייצור (במיוחד שטיפות הוויפר בין שלבי הייצור השונים).^Y

חברות רבות מספקות חלקי ציוד שונים למערכות הטיפול במים במפעלי מיקרואלקטרוניקה, רק חלק קטן מהן, מספקות מערכת ייצור UPW שלמה לתעשייה.

בין הספקים הגדולים ביותר של מערכות המים בסקטור זה, ניתן למנות את Technologies, Kurita Water, Ovivo Switzerland AG, Veolia, GE Water, Siemens Water, Organo Corporation, Nomura Micro Science, Industries.

2.2 תהליך ייצור שבב

מיקרו-שבב מורכב ממספר גדול של מעגלים חשמליים (טרנזיסטורים) המשמשים למיתוג או הגברה של אותות חשמליים. מספר הטרנזיסטורים למ"מ מרובע יכול להגיע למיליון ואף למעלה מכך.

מיקרו-שבבים מיוצרים על פני פרוסות (Wafer) מסיליקון בתהליך ארוך, מרובה שלבים ומורכב.

הפרוסות מיוצרות בקטרים קבועים – הנפוצים ביותר במפעלים המתקדמים היום, בקוטר 300mm, כאשר פרוסות נוספות מיוצרות גם בקוטר 200mm, 150mm ואף בקטרים קטנים יותר. תהליך הכנת מצע הסיליקון גם הוא דורש שלבים רבים של דיקוק וליטוש במטרה להגיע לעובי מדויק וכן תנאי ניקיון ואיכות נאותים.

במהלך הייצור, הפרוסה עוברת מחזורי ייצור רבים הכוללים כל אחד, 4 תהליכים יסוד:

1. גידול שכבות בעלות תכונות חשמליות ספציפיות בתהליכי דיפוזיה (Diffusion) או שיקוע (Deposition).

2. יצירת הדפס בעזרת תהליכי פוטוליטוגרפיה (Photolithography). הפרוסה מצופה בחומר אורגני רגיש לאור המשנה את תכונותיו בעקבות חשיפה לאור, הנעשית דרך מסיכה, החושפת חלקים מסוימים ומכסה אחרים.

3. איכול (Etch) השכבות שגודלו (1) בהתאם להדפס הרצוי (2). איכול סלקטיבי של הפוטורזיסטור - רטוב באמצעות תמיסות ויבש באמצעות גז או פלסמה.

4. סימום (Implant) חלקים סלקטיביים בפרוסה ביונים לקבלת ההתקן החשמלי הרצוי.

פרוסת הסיליקון הופכת מחומר מבודד (כחומר גלם) לחומר מוליך בעקבות הסימום. חיבור המבנה למקור מתח מאפשר קבלת התקן המוליך למחצה (להלן: מל"מ), כלומר מוליך זרם בתנאים מבוקרים בלבד.

תהליכי ייצור נוספים כוללים שלבים כגון :

· Electroplating – שכבת מתכת (נחשת בדרך כלל) ממוקמת על פרוסת הסיליקון וחלקיקי מתכת לא רצויים מלוטשים ממנו.

· חיתוך הפרוסה למיקרו-שבבים.

UPW משמשים בעיקר בשלבי הליטוש, האיכול וה- Electroplating לניקוי הפרוסה מחומרים וחלקיקי פסולת שונים. שבבי הסיליקון נשטפים לאחר כל איכול של שכבת מל"מ נוספת, כאשר יש עשרות כאלה בשבב אחד – תהליך זה מחייב צריכת כמויות גדולות של מים להכנת השבב, בנוסף, התהליכים משתנים ומתקדמים ללא הרף כך שהדרישות לניקיון המים עולות, ככל שמספר השלבים גדל.

שלב הליטוש נקרא גם ("Chemical Mechanical Polishing") CMP ונעשה באמצעות תערובת מימית המכילה תרחיף דק (fine grit) ובאמצעות רפידת ליטוש. לאחר שפני השטח לוטשו, נשטפות פרוסות הסיליקון באמצעות UPW.

שיפור התכונות החשמליות של ההתקן (גודל זיכרון, מהירות תגובה וכו') מדור לדור, מתאפשר כתוצאה מהקטנת הגודל הפיסיקלי של רכיבי השבב כך שניתן להוסיף יותר רכיבים ליחידת שטח מרובע. טכנולוגיית ייצור רוחב התעלה ('Node' Line width) משתכללת וכיום האתגר הוא בייצור רכיבים ברוחב תעלה קטן מ-20nm, **דבר המחייב רמת ניקיון גבוהה יותר של המים** למניעת קיצור החוטים בשבב בגלל זיהומים במים.

הקטנת הרכיבים מכתיבה מספר גדול יותר של שלבים בייצור המיקרו-שבב. מספר שלבי שטיפה גדול יותר, משמעו כמות מים מוזנים גבוהה יותר, המובילה, ליצירת זרמי שפכים נוספים, המגדילים את כמות השפכים בה יש לטפל ואת השונות של הזרמים.

בנוסף להקטנת גודל הרכיבים, קיימת מגמה של הגדלת קוטר הוויפר במטרה להקטין עלויות באמצעות הגדלת מספר המיקרו-שבבים המתקבלים מכל וויפר. כיום, כאמור, גודל הוויפר הנפוץ במפעלים מתקדמים עומד על 300nm, אך כבר ב-2013 יתחילו מפעלים לייצר וויפרים בקוטר 450nm באופן מסחרי. מפעלים כאלה ידרשו לכמויות UPW גדולות יותר לייצור, בגלל כמות המים הגדולה יותר שתדרש לייצור כל וויפר.

בעולם קיימים שני סטנדרטים חשובים בתחום המיקרואלקטרוניקה – SEMI Standards^{vi} ו-ASTM Standards^{vii}. הסטנדרטים מגובשים על ידי יצרנים מובילים, בשיתוף עם מעבדות בין לאומיות ומומחים בתחום.

הסטנדרטים מתעדכנים לגבי המים הנדרשים – מים באיכות שהולכת ועולה, בהתאם לרוחב התעלה שהולך וקטן.

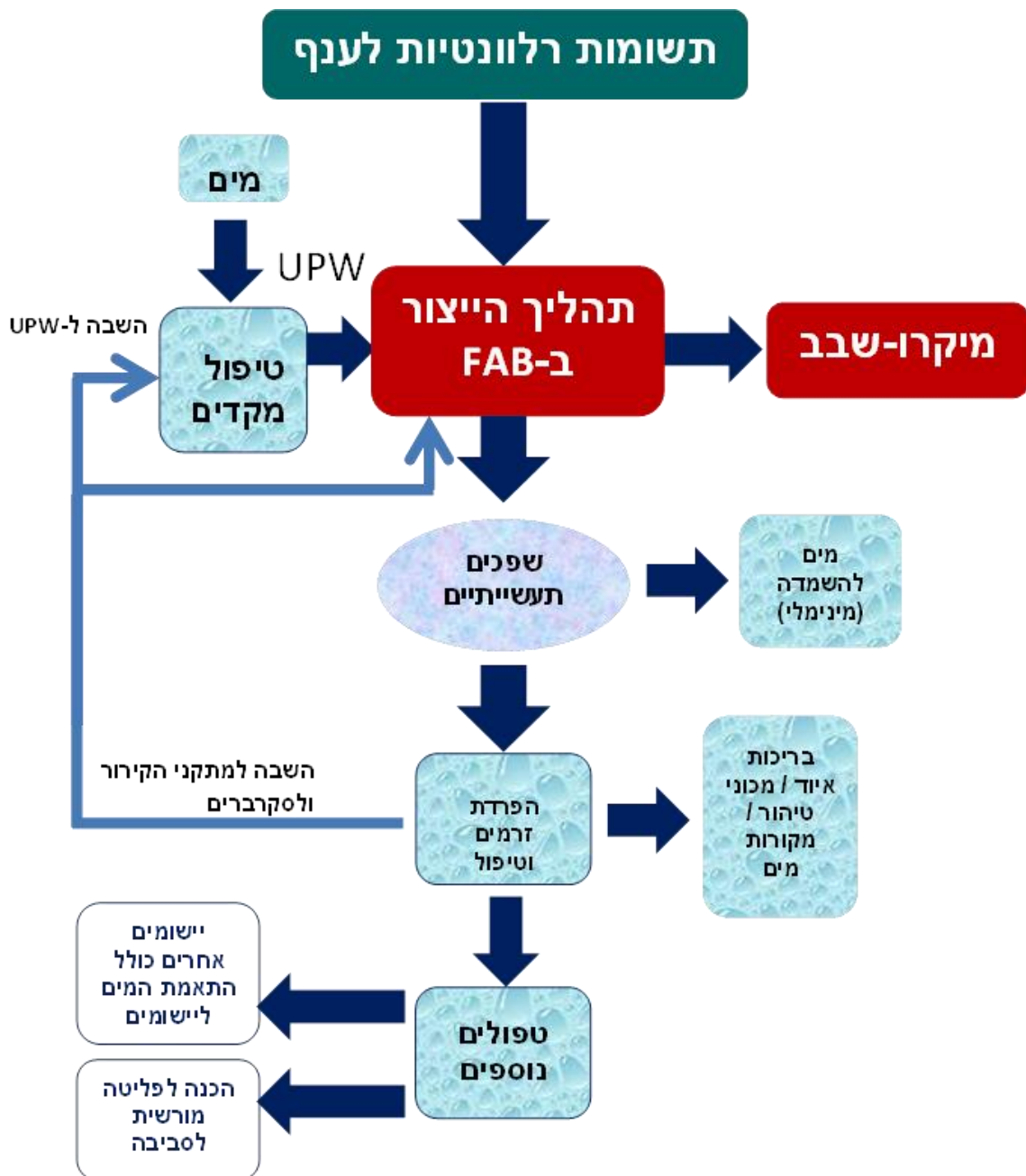
מפעלים שונים משתמשים בסטנדרטים שונים. חברות מיקרואלקטרוניקה קטנות, שבדרך כלל מייצרות ברוחב תעלה גדול יותר, נוטות יותר להשתמש ב-ASTM, בעוד מפעלים העושים שימוש בטכנולוגיות העדכניות ביותר יעדיפו את הגרסה העדכנית של SEMI, ובנוסף, יפתחו התאמות פנימיות במפעל באמצעות התוויות ה-ITRS.

ה-ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) הוא מסמך המשרטט צפי להתפתחויות צפויות בתחום, כולל הנחיות לגבי קצב צריכת המים ואופן השימוש בהם בפב.

4.1 דיאגרמת מהלך המים בתעשיית ייצור שבבי המל"מ (מוליכים למחצה)

הדיאגרמה הבאה (תרשים 1) מבטאת את מהלך המים בתעשיית ייצור שבבים מוליכים למחצה, אנו ננסה לעקוב אחר מהלך זה, על מנת להבהיר את הנקודות החשובות המהוות אתגר עבור תעשיית המים הישראלית.

תרשים מספר 1: דיאגרמת מהלך המים בתעשיית ייצור שבבי מל"מ



כאמור, מים משמשים בכל שלבי הייצור: – ייצור הוויפר, CMP (ליטוש), מי תהליך לתשתיות.

להלן נבדוק מהיכן וכיצד מגיעים המים הנכנסים לתהליך, אילו טיפולים מקדימים הם עוברים, ואילו טכנולוגיות משמשות לטיפול בשפכים למטרת השבה ליישומים אחרים, לפני פליטה מותרת לסביבה, או להמשך שימוש בתחומים אחרים (מחזור).

4.2 מים מוזנים

תהליך ייצור שבבי מל"מ צורך כמויות גדולות של מים, במיוחד לניקוי ושטיפת השבבים, כ- 10 מ"ק מים נדרשים לייצור וייפר בקוטר 300mm, מהם כ-70% UPW. בממוצע צורך ייצור מיקרו שבב 16,000 מ"ק מים לטון מוצר.^v

הזמינות והאיכות של המים המוזנים קריטית בתהליך הייצור של השבבים, דוגמא לכך, ניתן למצוא בסגירת מפעל אינטל במחוז Kildare באירלנד בשנת 2010 בעקבות חשש לזיהום מי הרשת בניטרטים ואמוניה, כתוצאה מפעילות המסת קרח בכבישים באמצעות חומרים שהכילו רכיבים אלה, על ידי הרשויות.

מים אלה היו נקיים מספיק לשתייה, אך לא עבור אינטל שעצרה את הפעילות באחד הפבים שלה עד שנפתרה הבעיה.^{viii} הנזק, במקרה זה, היה כפול – נזק כלכלי כתוצאה מהשבתת הפאב וכן נזק תדמיתי בנוגע לניהול בר-הקיימא של החברה בעיני מחזיקי המניות החיצוניים. ניתן, אם כך לראות שחברות ייצור שבבי המל"מ רגישות לנושאי מותג (Brand Name) ואחריות סביבתית, רגישות המדרבנת אותן לנהוג משנה זהירות בנושא ההשפעות הסביבתיות של תהליך הייצור, אפילו במקומות בהם עדיין אין רגולציה מחמירה רלוונטית.

UPW מוזנים כאשר יש מגע ישיר בין המים להתקן המיוצר – בשטיפות והניקויים של הוויפרים והשבבים, בשלב ייצור האדים לחמצון פני שטח הסיליקון, בתהליכי האיכול ובהכנת מסכות הפוטוליטוגרפיה.

סוג נוסף של מים מוזנים במפעל פבריקציה הם מי תהליך שאינם UPW. מי התהליך מוזנים לשימושים בחלקי ציוד אחרים בתהליך כמו מגדלי הקירור, משטפי פסולת החומצה (Scrubbers) ומערכות HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning systems).

חוק מור (Moore's low), חוק אמפירי העוסק בהגדלת כח החישוב לעמת הקטנת גודל השבב, שנהגה ב-1965 על ידי גורדון מור (לימים ממייסדי אינטל), גורס כי עצמת המחשוב תוכפל כל שנתיים בערך, וזאת באמצעות הכפלת צפיפות הטרנזיסטורים ליחידת שטח בשבב. הקטנת הטרנזיסטור, משמעה, הקטנת רוחב התעלה.

עם מזעור טכנולוגית רוחב התעלה (line width), מפרט הדרישות בתחום ה-UPW הולכות ומחמירות, מתוך חשש שחלקיקים בגודל הולך וקטן במים המוזנים יגרמו לפגיעה בפעילות השבב.

האתגרים בתחום זה, אם כן, כוללים גם אתגרים בתחום שיטות לאיתור וזיהוי חלקיקים בגדלים הולכים וקטנים בייצור. כיום הדטקציה מתאימה לזיהוי חלקיקים בגודל 59nm, כאשר התעשייה זקוקה לדטקציה שמגיעה גם עד 10nm כולל זיהוי סוג החלקיקים.

אתגר נוסף, משלים, הוא הוצאת החלקיקים הלא רצויים, לאחר שזוהו, חלקיקים אלה כגון עקבות מתכות, אורגניים ומלחים קטנים מ-30nm, הנקראים "Killer Particles".

תכולת אורגניים כוללת (TOC- Total Organic Carbon) בריכוז נמוך מ-2ppb איננה אמורה להזיק בתהליך ייצור השבב, אולם תרכובות אורגניות מסוימות (Critical Organics) עשויות להיות מזיקות יותר מאחרות, למשל – אוראה, תרכובות המכילות הידרוקסיד, וכאלה המכילות חנקן, כלור או ברום. גם כאן, יש צורך בזיהוי סוג וריכוז החומר ובהרחקתו.

בין הדוגמאות הנוספות לחלקיקים הנחשבים מזיקים במיוחד ניתן למנות חלקיקי סיליקה, או סיליקה מומסת, יוני מתכת (בריום, קלציום, נחושת) וחמצן וחנקות מומסים במים.

רשימות מלאות ניתן למצוא בתקני התעשייה.

4.2.1 טכנולוגיות הטיפול במים המוזנים

טכנולוגיות הטיפול המשמשות בייצור UPW הן טכנולוגיות מתקדמות מאוד. השוני והייחוד בטיפולים במקומות שונים דרך כלל נובעים מההרכב המדויק של הטכנולוגיות בשימוש וסדר הפעולות המתבצע.

הגורמים הנלקחים בחשבון כאשר מתכננים מערכת טיפול כזו, כוללים את מקור המים המוזנים ואיכותם, טכנולוגיית רוחב התעלה המשמשת בתהליך הייצור, דרישות הלקוח ועוד.

תהליך הטיפול כולל בדרך כלל שלושה שלבים עיקריים: טיפול קדם, Demineralization ו-polishing.

טיפול הקדם עשוי לכלול אחת או יותר מהטכנולוגיות הבאות:

- סינון (Media Filtration)
- פחם פעיל (Activated Carbon)
- סינון (Cartridge Filter)
- UF (Ultra Filtration)

Media Filtration משמשת בדרך כלל להוצאת המרחפים בשילוב פחם פעיל שיעיל מאוד בהוצאת כלור (אלמנט חשוב בעיקר אם המים ממקור מוניציפלי) כמו גם הוצאת Organic Carbon.

UF היא אלטרנטיבה יעילה והשימוש בה נמצא במגמת גידול יחסית לשימוש בשילוב בין Media Filtration לפחם פעיל, בין היתר בגלל עלויות הפעלה הנמוכות יותר של UF.

:Demineralization

סינון בממברנות אוסמוזה הפוכה (RO) נעשה במטרה להרחיק יונים מומסים, תרכובות אורגניות וביולוגיות, סיליקה, בור (Boron) וחלקיקים בעייתיים נוספים. שימוש ב-Two-train RO במקום RO רגיל הוכח כיעיל יותר ומגמת ההטמעה של מערכות כאלה מתרחבת. במפעלים בהם הדרישות לנקיון ה-UPW נמצאות ברף הגבוה ביותר, מחליפות, לעיתים מערכות HERO (High Efficiency Reverse Osmosis) את מערכות ה-RO או ה-Two-train RO.

טכנולוגיות נוספות:

- החלפת יונים (IX – Ion Exchange)
- EDI (Electrodeionisation)

טיפול ה-Polishing, עשוי לכלול שילוב ברצפי טיפול שונים של חלק מהטכנולוגיות הבאות:

- החלפת יונים (IX – Ion Exchange)
- EDI (Electrodeionisation)
- UF (Ultra Filtration)
- Degasification
- UV

כמו כן, בשלב ה - polishing, מתבצעת בקרת הטמפרטורה – שמהווה ניטור של פרמטר קריטי לייצור.

טכנולוגית IX מסייעת בהפחתת ריכוז הסיליקה לאחר טיפול האוסמוזה ההפוכה ומגדילה את יציבות פעולת המערכת מתוך כך ששימוש בה מפחית את הצורך ברגרציות.

אולם, תהליך רענון מחליפי היונים מייצר תמלחת ויש אתגר בצמצום כמויות התמלחת היוצאת מהתהליך.

Degasification membrane או Vacuum Degasifier משמשים להוצאת חמצן ואורגניים נדיפים.

EDI יכולה לשמש כתחליף ל-IX או מיד לאחר האוסמוזה ההפוכה, היא שיטה יעילה להפחתת ריכוזי בור וסיליקה, ומגמת השימוש בה הולכת ומתרחבת. עלויות Capital cost גבוהות מהוות חסרון באימוץ הטכנולוגיה לשימוש.

ניתן להשתמש ב-UF במספר מקומות בתהליך הייצור – כהגנה על ממברנות ה-RO בתחילת התהליך, וגם בסופו לפני מעבר המים לייצור השבבים.

UV משמש בעיקר להוצאת TOC, טיהור ביואורגניזמים וכן לפירוק שאריות אוזון במידה ומתבצע תהליך אוזוניזציה. השימוש ב-UV נרחב בפבים באסיה.

כאשר מקור המים המתקבלים הוא מהתפלה, אחוז הבורון במים גבוה. בורון הוא חומר מזיק בתהליך ייצור השבב, ויש צורך להוציאו, בדרך כלל באמצעות תהליך הכולל תיקון PH (<10), תהליך ממברנלי ואז IX. או באמצעות EDI או EDR. הוצאת בורון ממים המכילים אחוז גבוה של חומר זה מהווה אתגר במדינות הסובלות ממחסור במים, למשל – אריזונה בארה"ב.

במפעל "Tower Semiconductor" במגדל העמק, מערכת ייצור ה-UPW תוכננה במקור לפי תהליך HERO, עם אחוז השבה בן 95%.

ריכוז החומרים בתמלחת באחוז השבה כזה, מחייב פינוי לים. על מנת לצמצם עלויות פינוי, פותחו ב-Tower טכנולוגיות ייחודיות המאפשרות להגדיל את אחוז הריקברי ולהקטין את אחוז התמלחת ל-0.5%.

4.2.2 כמויות צריכת מים בתעשיית ייצור שבבים

תהליך ייצור שבב סיליקון צורך, כאמור, כמויות גדולות של מים, הנדרשות לניקוי ושטיפה במהלך הייצור. פב צורך כ-10 מ"ק מים ליצירת וייפר בן 300mm, מהם כ-70% UPW (תיאור שלבי הייצור בסעיף 2.2), 7,500-15,000 מ"ק מים ליום במפעל פב בגודל סטנדרטי – צריכה דומה לצריכה של עיר בת 40,000-50,000 תושבים.^v

מערכת הטיפול ב-UPW צורכת את כמות המים הגדולה ביותר בפב. מגדלי הקירור משתמשים בכ-30-60% מכמות המים למערכת ה-UPW, כתלות בקצב האידיוי המקומי.

4.3 שפכי תהליך ייצור השבבים

ייצור שבבי מל"מ, צורך כמויות גדולות של מים נקיים וטהורים – בדרגה הגבוהה ביותר. בהתאם, התהליך מייצר כמויות שפכים גדולות.

בתהליכי הכנת השבב משמשים מספר רחב של תמיסות וכימיקלים. השפכים, כתוצאה מכך, מכילים כמויות קטנות של ארסן, אמוניום הידרוקסיד (NH_4OH), אנטימון, זרחן, מי חמצן, חומצה חנקתית (HNO_3), חומצה זרחתית (H_3PO_4), חומצה גופרתית (H_2SO_4), חומצה הידרוכלורית (HCl), חומצה הידרופלואורית (HF) ועוד זיהומים כתוצאה מתהליך הייצור כגון סיליקה, חלקיקי סיליקון, עופרת, ברזל ועוד.

הרכב הזרמים המדויק בפב תלוי בתהליכי הייצור המקומיים, בדרך כלל אינו זמין לציבור וחסוי בשל שמירת החברה על ה-IP של תהליכי הייצור.

פבים נוטים לשים את הדגש על אופטימיזציה של תהליכי הייצור, כלומר הפקה יעילה של ה-UPW, אולם, דגש מושם גם על הפן הסביבתי מבחינת עמידה ברגולציות, וכן על נושא ה-BRAND NAME של החברה היצרנית, ויש לכן, בהחלט, מקום לשיפור וחדשנות בתחום הטיפול בשפכים וחדשנות זו, היא חיונית להמשך שיפור ייצור השבבים.

האתגרים העומדים בפני תעשיית המיקרואלקטרוניקה בנושא הטיפול בשפכים מתחלקים לשני חלקים – טיפול בשפכים היוצאים מהתהליך והפחתת כמות השפכים היוצאים.

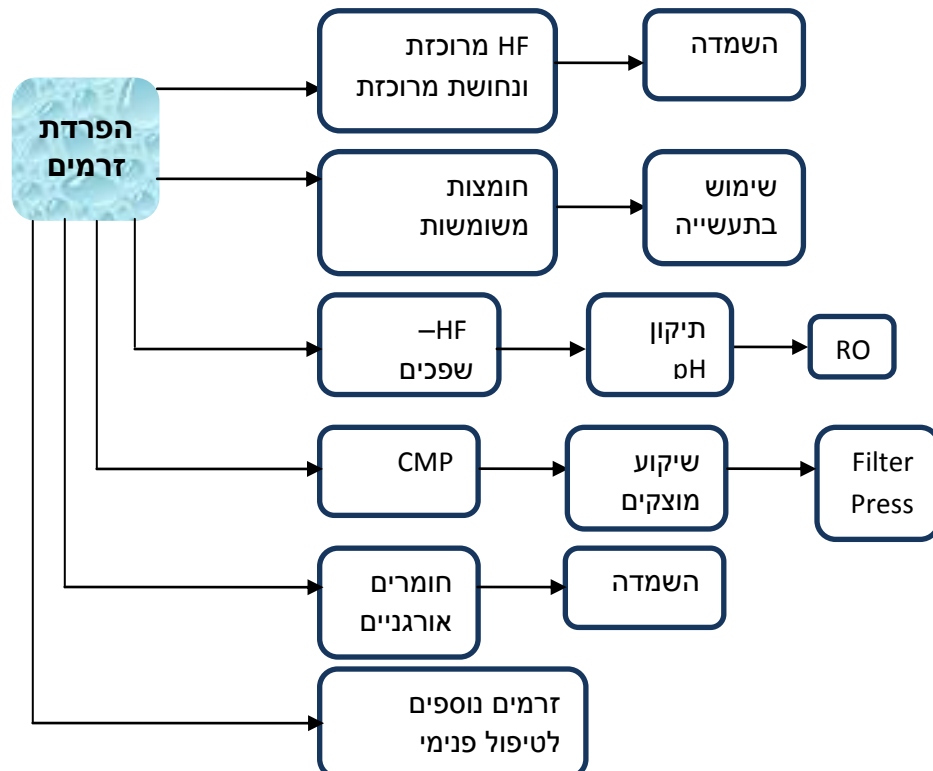
ניסיון להתמודד עם האתגר הראשון סותר לעיתים את מטרותיו של השני ולהיפך, לדוגמא – השבה מגדילה את ריכוז ה-TOC ויוצרת קושי בפליטה לסביבה.

האתגרים בתחום הטיפולים בשפכים, קשורים בהפרדת זרמים במפעל וטיפול ייעודי בכל זרם על מנת להגדיל את יעילות הטיפול ואת יכולות ההשבה לתהליך. למשל הפרדה של שטיפות

נקיות (Last Rinse Drain), הפרדת שטיפות חומציות, זרמים המכילים TOC, זרמי CMP, HF.

דוגמא להפרדת זרמים במפעל Tower Semiconductors בישראל:

תרשים מספר 2: הפרדת זרמים במפעל Tower Semiconductors



יש צורך בהתייחסות לשינויים בתהליכי הייצור בהקשר של שינוי טכנולוגיות הייצור עם הקטנת רוחב התעלה, סוגי כימיקלים בשימוש למשל, התייחסות לאפקט המצטבר של הננו-חלקיקים בשפכים וכן ניהול יעיל של כמויות שפכים הולכות וגדלות, בעיקר בפבים קיימים שהפעילות בהם הורחבה.

בנוסף יש אתגר במחקר והטמעה של טכנולוגיות המאפשרות מיצוי חומרים בעלי ערך מהשפכים (למשל- נחושת ופלואורידים). הרווח במקרה זה הוא כפול - הפקת חומר בעל ערך לתהליך לצד הוצאת מזהם מהשפכים.

ריכוז הפלואורידים המותרים לפליטה בקולחים מוגבל, וקיימת מגמת החמרה בנושא זה, במיוחד במדינות שאחוז המים הממוחזרים בהן גבוה. יש מגמה להפחתת השימוש בנגזרות פלואור בגלל ההשפעה הסביבתית השלילית של חומרים אלה.

4.3.1 טכנולוגיות הטיפול בשפכים

טכנולוגיות הטיפול בשפכים בתעשיית ייצור שבבי המל"מ הן בדרך כלל טכנולוגיות ידועות ומוכרות בענפי התעשייה האחרים.

הטיפול כולל שלבים כימיים ופיסיקליים שונים, ויעילותו תלויה מאוד ביעילות הפרדת הזרמים והתאמת טיפול ייעודי לזרמים השונים.

טכנולוגיות הנהוגות בטיפול בשפכי תעשיית המיקרואלקטרוניקה כוללות מערכות שיקוע וקואגולציה, איזון ונטרול וכן תהליכים מתקדמים כגון: תהליכי חמצון מתקדמים, IX, MBR, Electrowining וסינונים באמצעות ממברנות.

Electrowining היא שיטה המשמשת למיצי מתכות מהשפכים באמצעות זרם חשמלי (בדרך כלל, בתעשיית ייצור המל"מ, מיצי נחושת מתהליך ה-CMP). יש אתגר בייעול התהליך למטרת הגדלת אחוזי המיצי.

גם החלפת יונים (IX) משמשת למיצי יוני מתכות מהשפכים, והשימוש בשיטה זו כחלק מתהליך מיצי המתכות מהשפכים נמצא במגמת התרחבות.

ממברנות RO משמשות, למשל, להוצאת פלואורידים, לאחר נטרול.

ממברנות HF (Hollow Fiber) משמשות להוצאת מוצקים מרחפים, משפרות את יעילות תהליכי ה-IX, ED ו-RO וחוסכות את הצורך בשימוש בכימיקליים פלואוקולנטיים.

טיפול ב-TOC נעשה, לעיתים, באמצעות MBR, טכנולוגיה זו עדיין איננה בשימוש נרחב, אך יש מגמה בהטמעתה בתהליך.

4.4 מחזור והשבה

במקומות רבים בעולם, התרחבות תעשיית המיקרואלקטרוניקה מוגבלת בשל אספקת מים מוגבלת. עלויות המים ועלות החריגות בצריכתם או בפליטות גדלות, וחשוב מכך - הרשויות הרגולטוריות דורשות עוד ועוד הפחתות בצריכת המים.

כאשר מתייחסים להפחתה בצריכת המים ובפליטות, נכון להתייחס לעקרון שלושת ה-R-ים: Reduce, Reuse, Recycle.

השפכים המטופלים המושבים בתוך הפב, מושבים, בדרך כלל, למגדלי הקירור ולסקראברים. כדי להגיע לאחוזי השבה גבוהים יותר, כלומר – מים מטופלים בדרגות ניקיון גבוהות יותר, יש

צורך בטכנולוגיות טיפול מתוחכמות ומתקדמות. הדרישות הרגולטיביות בנושא הקצאות מים מחמירות במקומות מסוימים וללא ספק יש מגמה של צמצום צריכת המים בפבים, דבר שיאלץ שילוב טכנולוגיות מתקדמות לטיפול בשפכים On site במטרה להשיבם לתהליך הייצור כ-UPW. השבה לתהליך כ-UPW מאתגרת עבור ייצרני שבבים מחשש לפגיעה בתהליך העדין של הייצור שתגרור פגמים בתוצר ומכאן - הפסדים כספיים, כך שהטכנולוגיות המוטמעות בהקשר זה, חייבות להיות אמינות מאוד וכדאיות כלכלית.

אחוז המים המושבים לתהליכים בתוך המפעל, (לתשתיות) תלוי ברגולציות המקומיות, בזמינות המים באזור, בתשתיות ועלויות הטיפול ובמדיניות החברה המפעילה את המפעל.

קולחים היוצאים מהמפעל, עשויים להיות ממוחזרים לשימושים נוספים (חקלאות, תעשיות) כתלות בתשתית וברגולציה המקומית.

תעשיית המיקרואלקטרוניקה היא תעשייה שמרנית מאוד, ייצרני השבבים חוששים מפגיעה בייצור בעקבות זיהומים ב-UPW, שעלולה להוביל לייצור אחוז גבוה של שבבים פגומים ומכאן לפגיעה כלכלית. לכן מעוניינים ייצרני השבבים בטכנולוגיות מוכחות ואמינות, וזהירים בהטמעת שינויים, אולם, שימור חוק מור, מחייב הטמעת פתרונות יצירתיים, במיוחד בתחום הוצאת חלקיקים וזיהומים אורגניים במים.

חברה העוסקת בייצור שבבים, תאמץ טכנולוגיה חדשה באם תהיה משוכנעת שאין בטכנולוגיה זו סיכון לאיכות היצור ומכאן, להפסדי רווחים. טכנולוגיות המאפשרות הגדלת יעילות המערכת והפחתת עלויות (גם כתוצאה מהתייעלות אנרגטית), עם עדיפות למערכות אמינות לאורך זמן עשויות לעניין יצרני שבבים.

התייחסות להתוויית ITRS חשובה גם היא.

יש היום היצע רחב של טכנולוגיות איכותיות, אחד האתגרים טמון בביצוע אינטגרציה טובה - חכמה ויעילה בין הטכנולוגיות השונות לבניית מערכת הטיפול. לדוגמא - שילוב RO ו-MBR.

5.1 שיפורים חיוניים של בעיות לא פתורות או שיפור למטרת התייעלות כלכלית

למיתון הכלכלי הייתה השפעה עמוקה על תעשיית המיקרואלקטרוניקה המייצרת מוצרי צריכה, דבר המחייב נקיטת צעדי התייעלות, בין היתר בטכנולוגיות המשמשות לטיפול במים ובכמויות המים והאנרגיה המושקעות בתהליך.

לדרישות ההולכות וגדלות בנוגע לרמת נקיון ה-UPW יש השלכות כלכליות, תהיה העדפה בתעשייה לציוד חדשני לייצור UPW, הגם אם עלותו גבוהה מן הציוד הקיים, במידה ויבטיח רמת אמינות גבוהה יותר (Reliability) ומכאן – רווחיות גדולה יותר של התהליך.

בתהליך הייצור המורכב של השבבים יש צורך באוטומציה מרבית של התהליך, ומכאן גם בניטור ובקרה של המערכות הפועלות.

5.2 התמודדות עם צרכים חדשים בסקטור כתוצאה מהזדמנויות חדשות

הגידול המהיר בתעשייה כמו גם הגדלת גודל הוויפרים, מספר השכבות בהם והקטנת רוחב התעלה בשבב, כל אלה צפויים להכתיב צריכות גבוהות יותר של מים ובאיכות הולכת וגדלה. כלומר - ללא התייעלות ידרשו כמויות הולכות וגדלות לייצור וויפר - ייצור וויפר בקוטר 450mm יצורך כמות מים גדולה פי 2.5 מייצור וויפר בקוטר 300mm.

הקטנת מימדי רוחב התעלה מעלה אתגרים כבדי משקל בתחום הטיפול במים המוזנים וההשבה. רוחב תעלה שיגיע ל-10nm - טווחי גודל שמתקרבים לסדרי הגודל של ה-DNA האנושי, יציב דרישות נקיון גבוהות ל-UPW. הדרישות יבואו לידי ביטוי, ראשית, בדטקציה של חלקיקים בגדלים האלה (Killer Particles) ובכיכום כמו גם בזיהוי תרכובות אורגניות מסוימות (Critical Organics), בשלב הבא, יהיה צורך בהוצאת האלמנטים הבעייתיים מהמים.

אחת הטכנולוגיות המתקדמות המשמשות בנושא זה הן ממברנות HF (Hollow Fiber) המהוות תחליף לשימוש בכימיקליים פלואקולנטים, דבר המעלה את יעילות התהליך ואת כדאיותו הכלכלית.

5.3 סביבה ורגולציה

חברות לייצור שבבי מל"מ צורכות כמויות גדולות של מים באיכות הגבוהה ביותר בתהליך, וזאת כאשר מפעלים רבים ממוקמים באזורים שסובלים ממחסור במים, כמו למשל דרום-מערב ארצות הברית (טקסס), אזור בו השפעת שינויי האקלים והגידול המהיר באוכלוסייה צפויים להחמיר את המחסור במים.

החשש מזיהום מקורות המים מהווה, גם הוא, נושא ראוי לתשומת לב בתחום זה, כיוון שרעלים דוגמת Freon ו-Trichloroethane וכן מתכות כבדות נמצאו בגופי מים בסביבת מפעלי פב.

חברות מיקרואלקטרוניקה רבות שמות דגש על נושא המיתוג (BRAND NAME) - דעת קהל חיובית, כחברות המגלות אחריות סביבתית, בין היתר, באמצעות חסכון בשימוש במים, אחוזים גבוהים של השבה, וטיפול בשפכים ברמות שלעיתים מגיעות אף למעל לדרישות הרגולציה המקומית.

גורמים ממשלתיים מחוקקים וגורמים תעשייתיים האחראים על הגדרת Best Practice מעודדים את התעשייה להגדיל את אחוזי ההשבה בתהליך, ולהחמיר את התקנים בנושא הרכב השפכים המטופלים - שתי מגמות אלה בעצם "נוגדות" האחת את השניה, שכן הגדלת אחוזי השבה גוררת יציאת שפכים מרוכזים יותר (ריכוז TOC גבוה), הצורכים טיפולים מורכבים ואינטנסיביים יותר לעמידה במפרטי הרגולציה.

התייחסות לסוגיה זו מהווה אתגר גדול בשנים הקרובות בתעשיית המיקרואלקטרוניקה. אחת האפשרויות לפתרון טמונה בטיפול (Zero Liquid Discharge) ZLD, אך על מערכות אלה להיות יעילות מבחינת צריכת האנרגיה, ולהראות כדאיות כלכלית.

החמרות נוספות בתחום כמויות ה-TDS (Total Dissolved Solids), תכולת המלחים ותכולת חומרים רעילים צפויות בשנים הקרובות, במיוחד עם העליה ביכולות הדטקציה של חומרים ספציפיים בריכוזים נמוכים. החמרות כאלה יעודדו ביצוע טיפולים מתוחכמים ויעילים באתר עצמו לטיהור נוסף בשפכים.

5.4 נתונים ואתגרים ממוקדי גאוגרפיה – המבט למזרח

ייצור שבבים ממוקם לעיתים קרובות באיזורים צחיחים בעולם, או כאלה הסובלים ממחסור במים, לדוגמא- חלקים מסינגפור, טאיוון, סין ארה"ב (אריזונה, טקסס) וישראל. באיזורים אלה, ובמיוחד במקומות מרוחקים מהים, פבים נדרשים לייעל את הייצור כך שיזדקקו לפחות מים וייצרו כמות קטנה יותר של שפכים מצד אחד, ומצד שני, שריכוז החומרים בשפכים המטופלים יענה על דרישות הרגולציה.

החברות המייצרות את חלק הארי בתעשיית ייצור השבבים מובאות ברשימה שלהלן.

Intel – U.S.A and all Over the World

Texas Instruments – U.S.A

I.B.M – U.S.A

A.M.D – U.S.A

Micron – U.S.A

SK Hynix - Korea

Freescale – U.S.A

STMicroelectronic – EU

Flash Alliance Ltd. - Japan

Taiwan UMIC – Singapore

TSMC – Taiwan

Samsung – Korea

Globalfoundries – U.S.A

NEC – Japan

SMIC - China

מספר השחקנים בשוק קטן עם העלייה במורכבות התהליך ובהתאם, בעלויות ההשקעה בתשתיות. מגמה זו צפויה להתחזק עם המעבר לזיפרים בקוטר 450mm.

עם עליה זו במורכבות בתהליך, מתחזקת מגמה של בניית פבים חדשים והרחבת פעילותם של הקיימים במדינות מפותחות, מתוך רצון להבטיח איכות ושמירת ידע. לכן אין להזניח מדינות אלה כיעד לשווק מערכות טיפול במים.

באסיה ובאיזור הפסיפי הגידול המהיר באוכלוסייה והצמיחה הכלכלית המהירה, מטילים עומס על מקורות המים, דבר שמציב אתגר בפני החברות לייצור השבבים הנמצאות באזורים אלה. מעבר של מפעלי ייצור רבים לאזורים אלה מחמיר את הבעיה הקיימת ממילא. בבייג'ינג, מצב אספקת המים כה חמור, שייצרני שבבים צריכים להוביל מים למפעל שלהם מספר פעמים בשנה. החברות הבין לאומיות הגדולות הפועלות באיזור בייג'ינג, מחזיקות מאגרי גיבוי משל עצמן עבור מפעלי הייצור שלהן, בנוסף למאגרי הגיבוי של רשויות המים של בייג'ינג וטאיוון.

פבים רבים, כאמור ממוקמים באזור האסיה פסיפי, אך כ-65% מהפבים ממוקמים בארה"ב^{ix}, כך שגם מדינה זו, במיוחד בחלקים הסובלים ממחסור במים (אריזונה למשל) מהווה יעד חשוב לתעשיית המים.

חברות המים העיקריות שעובדות עם יצרני המיקרואלקטרוניקה הן:^v

Veolia

Ovivo Switzerland AG

Siemens

GE

Kurita Water Industries

Organo Cooperation

Nomura Micro Science

החברות בדרך כלל מספקות מערכות שלמות מטכנולוגיות שלהן או טכנולוגיות שהן מטמיעות במערכות שלהן, והן מהוות יעד חשוב לחברות המעוניינות לספק חלק מהפתרון כטכנולוגיה חדשנית.

נספח - מילון מושגים

מושג	הסבר
UPW	Ultra Pure Water
HF	Hollow Fiber
ZLD	Zero Liquid Discharge
Wafer	פרוסת סיליקון עליה מיוצרים מיקרו שבבים
fabs	מפעלי פבריקציה
Etch	איכול
Implant	סימום
CMP	Chemical Mechanical Polishing
ASTM	American Society for Testing and Materials
ITRS	International Technology Roadmap for Semicinductors
HVAC	Heating, Ventilation and air conditioning
HERO	High Efficiency Reverse Osmosis
IX	Ion Exchange
UF	Ultra Filtration
RO	Reverse Osmosis
EDI	Electrodeionisation
MBR	Membrane Bioreactor

-
- ⁱ שירי פרוינד קורן, ד"ר גלעד פורטונה, הפקת גז ונפט בראי אתגרים גלובליים לתעשיות המים, מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית ו-Israel NewTech, דצמבר 2011
- ⁱⁱ שירי פרוינד קורן, ד"ר גלעד פורטונה, כריית מחצבים בראי אתגרים גלובליים לתעשיות המים, מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית ו-Israel NewTech, מרץ 2012
- ⁱⁱⁱ שירי פרוינד קורן, ד"ר גלעד פורטונה, ייצור תרופות בראי אתגרים גלובליים לתעשיות המים, מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית ו-Israel NewTech, מאי 2012
- ^{iv} שירי פרוינד קורן, ד"ר גלעד פורטונה, תעשיית המזון בראי אתגרים גלובליים לתעשיות המים, מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית ו-Israel NewTech, אוקטובר 2012

^v Shirley Morgan-Knot, Jolie Hudson, Hubert Jeaneau, "Water Risks to Business", UBS - UBS Investment Business, April 2011.

^{vi} <http://www.semi.org/standards>

^{vii} [/http://www.astm.org](http://www.astm.org)

^{viii} <http://www.pcauthority.com.au/News/165890,irish-intel-chips-get-fertiliser.aspx>

^{ix} GWI, Pure Water, Semiconductors and the recession, Vol 10, Issue 10 (October 2009)



מוסד שמואל נאמן

למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

טל. 04-8292329, פקס. 04-8231889

קרית הטכניון, חיפה 32000

www.neaman.org.il