

# התפתחות טכנולוגיית משתילי היונים

מהציקלוטרון של לורנס, דרך קלוטרונים של פרויקט מנהטן, פצצה האטומית על הירושימה ועד משתילי יונים Varian ו Nova בפאב-8 של Intel בירושלים

מאמר אקדמי-היסטורי עם עדות טכנית ממקור ראשון

מחבר:

**איסי גייר (Issi Geier)**

מהנדס ציוד ותהליכים Group leader — Ion Implantation

Fab 5 , Fab 7 Jan 1983 -june 1984

1995–1984 | Intel ירושלים — Fab-8

Fab 8' intel site' Fab 18 1999 -1984 Automation IT

ליטוגרפיה (SVGL MICROSCAN) ASML 248 ננומטר, ניקון 193 ננומטר 1999 עד 2005

Defect Metrology Fab18' Fab 28 2005-2013

Hitachi Etchers 2013-2015

VSP ופרישה לגימלאות 2015, סך הכול 32 שנה באינטל

<https://www.intel-fab8-israel-memory-and-tchnology.co.il/>



intel.

# FAB8

## אתר הזיכרונות

אתר זה נועד לשמר, לתעד ולהנגיש את ההיסטוריה של FAB8

<https://www.intel-fab8-israel-memory-and-tchnology.co.il/>

## מבוא — מקורות הטכנולוגיה וסקירת המאמר

טכנולוגיית Ion Implantation היא אחת הטכנולוגיות המרכזיות ביותר שאפשרו את ההתפתחות המהירה של תעשיית המוליכים-למחצה. באמצעות השתלת יונים ניתן להחדיר אטומים לתוך גביש סיליקון בצורה מדויקת מאוד, ולשלוט בתכונות החשמליות של החומר. שליטה זו מאפשרת יצירת אזורי הולכה שונים — הבסיס לפעולת הטרנזיסטורים במעגלים משולבים. תהליך ההשתלה מאפשר שליטה בשלושה פרמטרים עיקריים:

| משמעות  | פרמטר        |
|---|--------------|
| עומק חדירת היונים בגביש הסיליקון              | אנרגיית הקרן |
| קצב ההשתלה — כמות יונים ליחידת שטח ליחידת זמן | זרם הקרן     |
| מינון היונים הכולל (Dose)                     | זמן ההשתלה   |

השוואה: דיפוזיה לעומת ייבון השתלה (Ion Implantation)  
שיטות לדופינג של סיליקון בתעשיית המוליכים למחצה

| קטגוריה                    | דיפוזיה (Diffusion)                     | ייבון השתלה (Ion Implantation)        |
|----------------------------|---|---------------------------------------|
| מנגנון פיזיקלי             | אטומים מתפשטים מפני השטח בגרדיאנט ריכוז | יונים מואצים ונורים לתוך הסיליקון     |
| טמפרטורת תהליך             | גבוהה מאד — 900–1200°C                  | טמפרטורת חדר (annealing) בנפרד)       |
| שליטה בעומק                | מוגבלת — תלויה בזמן ובטמפרטורה          | מדויקת — נקבעת ע"י אנרגיית הקרן (keV) |
| שליטה בריכוז               | מוגבלת — תלויה במקור ובאטמוספירה        | מעולה dose — נשלטת ע"י זרם הקרן       |
| מסיכה (Masking)            | oxide/nitride עבה נדרשת                 | photoresist מוספיק — גמישות רבה יותר  |
| נזק גבישי (Crystal damage) | מינימלי — אטומים נכנסים בנחת            | משמעותי annealing — חיוני לתיקון      |
| עידן שימוש                 | דור ראשון — שנות ה-60 וה-70             | דומיננטי משנות ה-70 עד היום           |

הדיפוזיה היא השיטה הוותיקה יותר: מחממים את הוופר לטמפרטורות גבוהות מאוד ומאפשרים לאטומים להתפשט פנימה מפני השטח. הבעיה היא שקשה לשלוט בדיוק על עומק ההתפשטות, ולחום הגבוה יש השפעה על שאר המבנים שכבר קיימים על הוופר.

השתלת יונים שינתה את כל התמונה: יורים יונים בדיוק מחושב — האנרגיה קובעת את העומק, הדוז קובע את הריכוז. זו שליטה כמותית שדיפוזיה לא יכולה להתחרות איתה..

ציוד מרכזי בתחום — Varian, Nova, Eaton: חברות שפיתחו את מכונות ה-ion implantation- המסחריות הראשונות.

שילוב מדויק של שלושת הפרמטרים מאפשר ליצור פרופילי דופינג מגוונים ומורכבים.

אולם שורשי הטכנולוגיה אינם בתעשיית האלקטרוניקה. מערכות קרן יונים פותחו בתחילה לצורך מחקר בפיזיקה גרעינית בשנות השלושים. לאחר מכן, בפרויקט מנהטן בזמן מלחמת העולם השנייה, שימשו מערכות אלו להפרדת איזוטופים של אורניום בקנה מידה תעשייתי. רק בהמשך עברו לשימוש בהנדסת חומרים ובתעשיית הסמיקונדוקטורים.

מאמר זה מציג את ההתפתחות ההיסטורית מלאה של התחום — מן הציקלוטרון של לורנס ועד לייצור שבבים בפאב-8 של Intel בירושלים — בשילוב עדות טכנית אישית ממהנדסי ציוד ותהליכים שעבדו בשטח.

המאמר מכסה את הנושאים הבאים:

- הציקלוטרון — בסיס הטכנולוגיה.
- הקלוטרון ופרויקט מנהטן — Oak Ridge ופצצת הירושימה.
- המעבר לתעשיית הסמיקונדוקטורים — Peter Rose, Extrion, Varian, Nova, Eaton, Axcelis.
- מבנה משתיל היונים — Freeman Source, Nova, קרן, דיסק, סריקה.
- תופעת Wafer Charging ופתרונות — Argon Backfill, Electron Shower.
- ניסוי Penny Detector.
- מדידות אחידות — OmniMap, Flash Anneal, CIMS/SIMS.
- סימולציה — TRIM90.
- אוטומציה — Station Controller, SECS-II.
- הכנס בגילדפורד ומגעים בינלאומיים.

## פליקס בלוך — משפט בלוך ותורת הפסים (1928)



פליקס בלוך פתר תנועת אלקטרונים בגביש הראה שהאלקטרון הוא גל מחזורי גילה את פסי האנרגיה נתן את הבסיס לכל האלקטרוניקה הכול מוכן, חוץ מגבישים נקיים

**Bloch's theorem for electrons in crystals**

Time-independent Schrodinger equation with periodic potential

Periodic potential  
 $V(x) = V(x+a)$

Bloch's theorem  
 $\psi_{nk}(x) = u_{nk}(x)e^{ikx}$

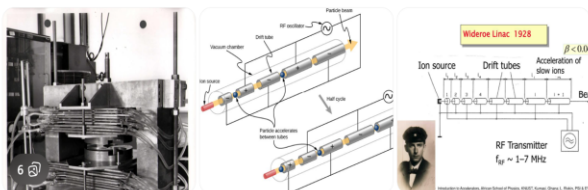
**n-type doping in silicon**

Column V elements donate an electron to the conduction band

The donor creates a small variation in the lattice potential resulting in an allowed state in the bandgap.

## רולף וידרואה — המאיץ הלינארי גרמניה (1930–1932)

מאיץ לינארי — גרמניה ואירופה (~1930–1932)



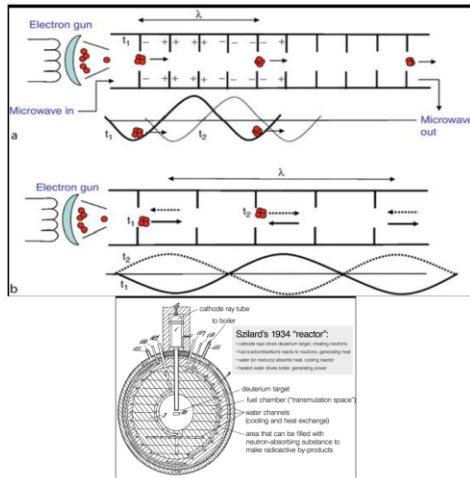
הדמות המרכזית

• רולף וידרואה

### הבעיה

- כיצד מאיצים חלקיקים לאנרגיות גבוהות
- מוגבל על ידי בידוד ופריצות DC מתח
- הפתרון — LINAC (Drift Tube)
- מוחל בין אלקטרודות (מתחלף) RF שדה
- (הגנה) אין שדה: בתוך הצינור
- האצה: בין הצינורות
- תנאי קריטי לסנכרון
- כל צינור ארוך יותר מהקודם —  $L_n \propto v_n$
- החלקיק תמיד נכנס בפאזה הנכונה
- בעיות שנתקלו
- סנכרון פאזה מדויק
- בידוד עם מתחים גבוהים
- מגבלות ואקום

## ליאו זילרד — האצה במתח משתנה ורעיון השרשרת (1930–1934)



פטנט תגובת השרשרת  
זילרד סודי רק לצי הבריטי בריטניה— 1934

- (1930–1932 ברלין) ניסיון האצה: שלב א'
- (AC/RF) עבד על האצה בשלבים עם מתח משתנה
- תזמון + אלקטרודות + מתח מתחלף: עקרון בעיות שנתקל בהן
- סנכרון פאזה לא מספיק מדויק
- מגבלות בידוד וואקום של התקופה
- איבודי אנרגיה גבוהים
- (1933–1934) קפיצה מחשבתית: שלב ב'
- **מה אם כל חלקיק יוצר עוד — במקום להאיץ חלקיק אחד?**
- רעיון תגובת השרשרת**
- (פרמטר הכפלה =  $k$ )  $N \rightarrow kN$
- גידול מעריכי  $\rightarrow k > 1$
- (כור) מצב יציב  $\rightarrow k = 1$
- ההבחנה המהותית**
- הכפלה פנימית  $\neq$  האצה חיצונית

## פרק א: הציקלוטרון — ראשית טכנולוגיית קרני היונים



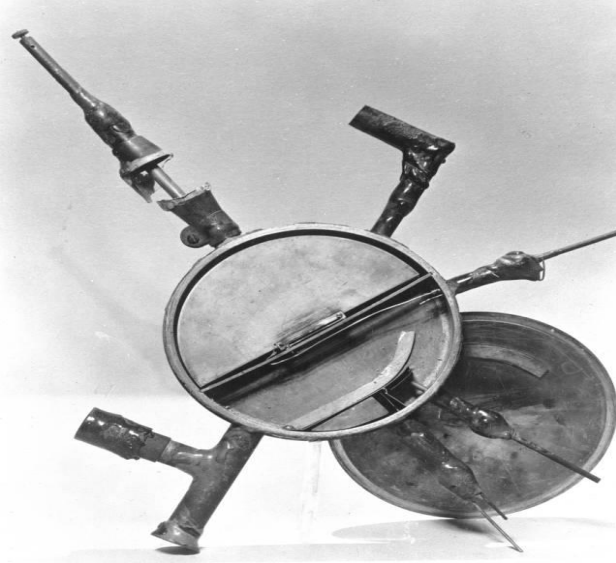
ארנסט אורלנדו לורנס (1901–1958) — ממציא הציקלוטרון, פרס נובל בפיזיקה 1939

ראשית הסיפור נמצאת בפיזיקה גרעינית של תחילת המאה העשרים. כדי לחקור את מבנה גרעין האטום, פיזיקאים חיפשו דרכים להאיץ חלקיקים טעונים לאנרגיות גבוהות. אחת ההמצאות המרכזיות בתחום זה הייתה הציקלוטרון.

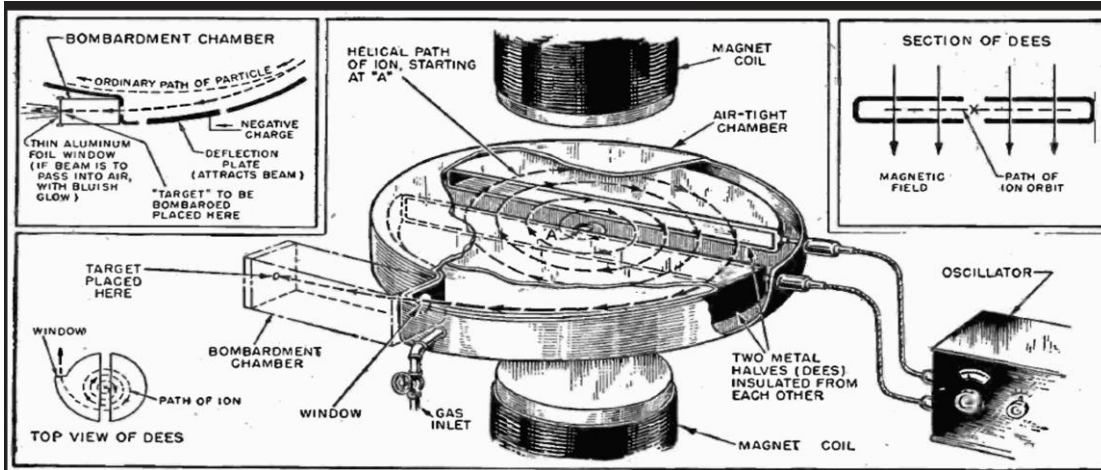
### המצאת הציקלוטרון

בשנת 1931 פיתח הפיזיקאי האמריקאי Ernest O. Lawrence את הציקלוטרון במעבדתו באוניברסיטת קליפורניה בברקלי. הציקלוטרון היה אחד ממאיצי החלקיקים הראשונים שאפשרו האצה יעילה של יונים לאנרגיות גבוהות יחסית במכשיר קומפקטי. חשיבות ההמצאה הוכרה כאשר לורנס קיבל עליה פרס נובל בפיזיקה בשנת 1939.

## עקרון הפעולה של הציקלוטרון



הציקלוטרון הראשון של לורנס בברקלי - 5 אינטס



הציקלוטרון הגדול — University of California, Berkeley, 1939

## מקור יונים

במרכז הציקלוטרון נמצא מקור יונים. שם נוצרים יונים של גז מסוים, בדרך כלל באמצעות פריקה חשמלית.

## שדה מגנטי

מגנט חזק יוצר שדה מגנטי שמכריח את היונים לנוע במסלול מעגלי. כאשר היונים מקבלים אנרגיה גבוהה יותר, רדיוס המסלול שלהם גדל.

## אלקטרודות האצה (Dees)

בין האלקטרודות מופעל מתח מתחלף בתדר רדיו (RF). בכל מעבר של היונים בין האלקטרודות, הם מקבלים תוספת אנרגיה. הם נעים במסלול ספירלי הולך וגדל עד שמגיעים לאנרגיה הרצויה.

## הבדל קריטי: ציקלוטרון מול משתיל יונים

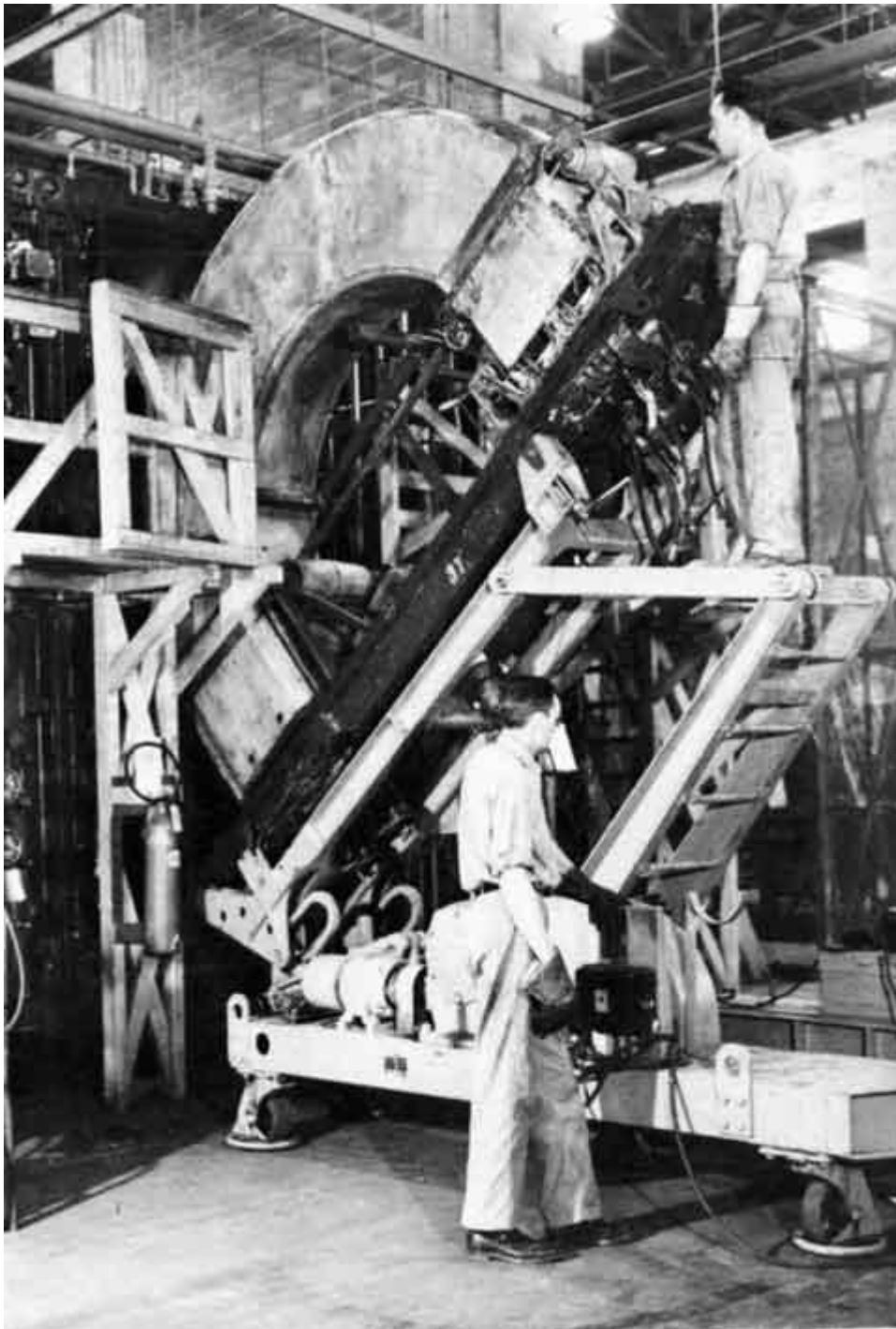
אחד הנקודות החשובות ביותר שיש להבהיר מיד בתחילת המאמר: למרות שהציקלוטרון הניח את הבסיס הטכנולוגי לקרני יונים, הוא שונה מהותית ממשתיל יונים:

| שיטת האצה ועקרון                              | מערכת              |
|---|--------------------|
| מתח מתחלף (RF) — האצה מחזורית במסלול ספירלי   | ציקלוטרון          |
| מתח ישר גבוה (DC) — מסלול יחיד, הפרדה מגנטית  | קלוטרון            |
| מתח ישר גבוה (DC) — האצה, הפרדה, פגיעה בדגימה | משתיל יונים מודרני |

מבחינה פיזיקלית, משתיל יונים קרוב הרבה יותר לקלוטרון — ספקטרומטר מסה — מאשר לציקלוטרון. ההבדל אינו סמנטי; הוא מהותי מבחינת מבנה המכונה ואופן פעולתה.

הציקלוטרון תרם לתחום בעיקר את התשתית ההנדסית: עבודה בוואקום, מקורות יונים, שימוש במגנטים חזקים, שליטה במסלול קרן.

## פרק ב: הקלוטרון ופרויקט מנהטן



קלוטרון — מכשיר הפרדת המסות שפותח בפרויקט מנהטן (Oak Ridge, 1944)

### הרקע — הצורך בהפרדת אורניום

במהלך מלחמת העולם השנייה, במסגרת פרויקט מנהטן לפיתוח נשק גרעיני, עלה הצורך להפריד כמויות גדולות של האיזוטופ Uranium-235 מאורניום טבעי. אורניום טבעי מורכב מ:

| איזוטופ     | אחוז וחשיבות                          |
|-------------|---------------------------------------|
| Uranium-238 | כ-99.3% — לא מתאים לביקוע גרעיני מהיר |
| Uranium-235 | כ-0.7% — מתאים לתגובת שרשרת גרעינית   |

רק U-235 מסוגל לקיים תגובת ביקוע גרעיני מהירה ולשמש כדלק לפצצה גרעינית. האתגר ההנדסי היה עצום: ההבדל במסה בין האיזוטופים קטן מאוד — שלושה נוקליאונים בלבד — ויש לייצר כמויות תעשייתיות.

## עקרון ההפרדה הפיזיקלי

הפתרון שנבחר היה הפרדה אלקטרומגנטית. העיקרון פיזיקלי פשוט: כאשר יונים טעונים נעים בשדה מגנטי, מסלולם מתעקם ברדיוס שתלוי במסה:

$$r = mv / (qB)$$

כאשר:  $r$  = רדיוס המסלול,  $m$  = מסת היונים,  $v$  = מהירות,  $q$  = מטען,  $B$  = השדה המגנטי. מכיוון שמסת U-235 קטנה מעט ממסת U-238, מסלולו שונה מעט. הבדל קטן זה מאפשר הפרדה.

## Calutron — מקור השם

המכשיר שפותח נקרא Calutron — שם שנוצר משילוב של:

- Cal — California (מקום פיתוח המכשיר).
- u — University (אוניברסיטת קליפורניה בברקלי).
- tron — Cyclotron (על שם הציקלוטרון של לורנס שבמעבדתו פותח).

אך למרות השם, הקלוטרון אינו ציקלוטרון! הוא ספקטרומטר מסה ענק. ההאצה מתבצעת בו באמצעות מתח ישר גבוה (DC), ממש כמו במשתיל יונים מודרני — ולא בשדה RF מתחלף כבציקלוטרון.

## מבנה הקלוטרון

### מקור היונים

אדי אורניום נוצרו מחימום חומר מקור ראוי, עברו יינון במקור היונים, ונוצרה קרן יוני אורניום.

### האצה

הקרן מואצת באמצעות מתח ישר גבוה — זו האצה אחת, לא מחזורית כבציקלוטרון.

### מגנט הפרדת מסות

הקרן נכנסת לשדה מגנטי חזק. יוני U-235 סוטים ברדיוס מעט שונה מיוני U-238 — ונאספים בנקודות שונות.

### קולקטורים

מקלטים (Collectors) מוצבים בנקודות המתאימות לאיסוף האיזוטופ הרצוי.

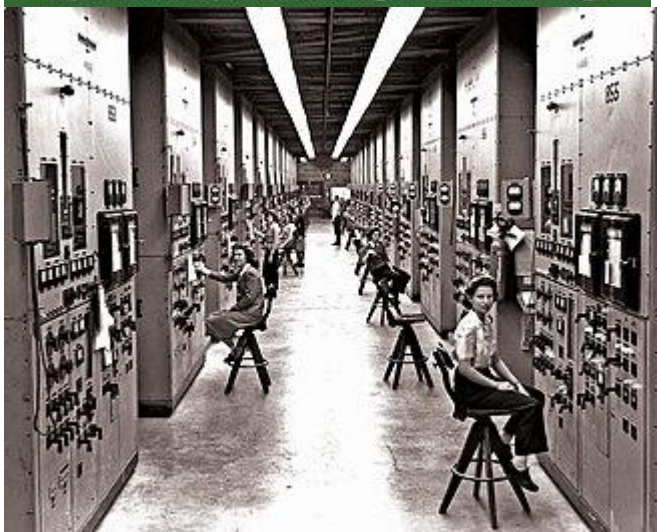
## Y-12 — מתקן ההפרדה ב-Oak Ridge, Tennessee

כדי לייצר כמות תעשייתית של U-235, נבנה ב-Oak Ridge מתקן הפרדה ענק הכולל מאות קלוטרונים הפועלים במקביל. המתקן נקרא Y-12 National Security Complex.

## Racetrack — מסלול המרוצים



Alpha Racetrack, Y-12 Electromagnetic Plant, Oak Ridge



מסלולי המרוצים (Racetracks) של הקלוטרונים ב-Oak Ridge

הקלוטרונים הותקנו במבנים שנקראו Racetracks. השם נובע מהסידור האליפטי של הקלוטרונים והמגנטים סביב ציר מרכזי — הדומה למסלול מרוצים. בכל Racetrack:

- עשרות קלוטרונים מסודרים בשני חצאי אליפסה.
- מגנטים עצומים שוקלים מאות טונות כל אחד.
- מערכות ואקום גדולות.
- מערכות איסוף האיזוטופים המופרדים.

ב-Y-12 פעלו תשעה Alpha Racetracks ושמונה Beta Racetracks. האולמות הגיעו לאורך מאות מטרים — מהמתקנים ההנדסיים הגדולים בתקופה. אלפי עובדים הפעילו את המתקן.

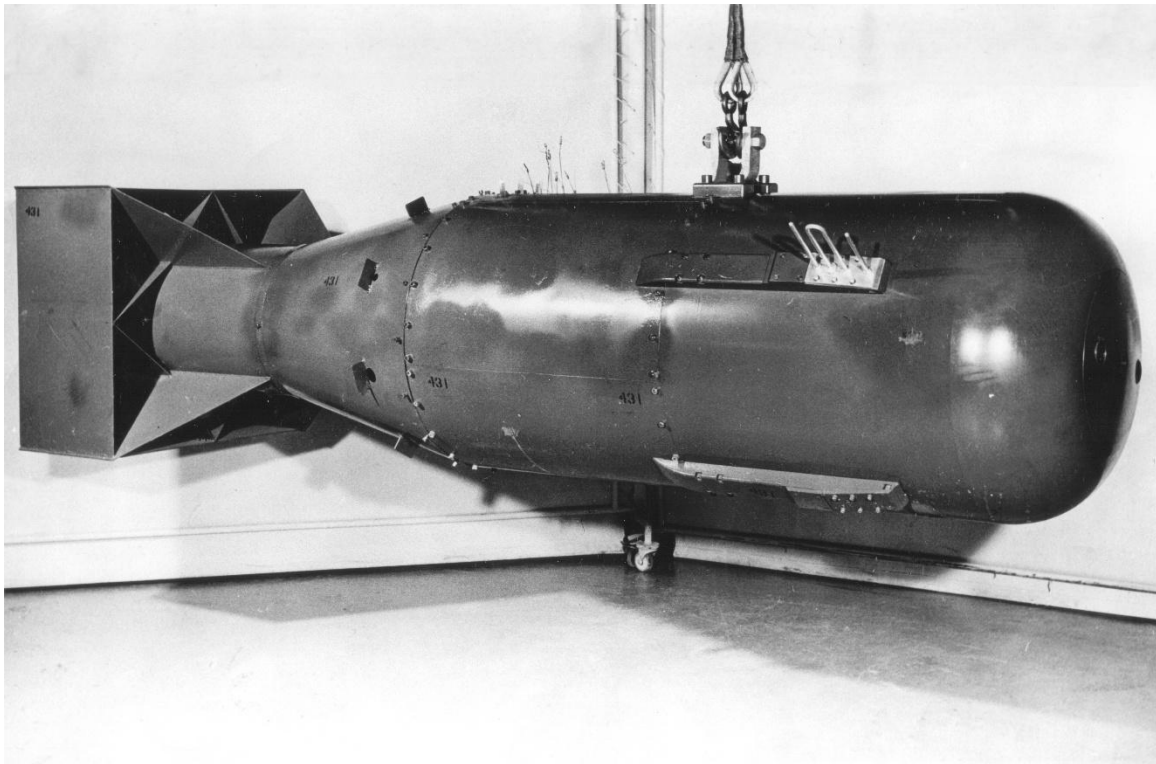
### פתרון ייחודי: כסף במקום נחושת

בניית המגנטים העצומים של הקלוטרונים דרשה כמויות אדירות של נחושת לסלילי האלקטרומגנטים. אולם בזמן מלחמת העולם השנייה הייתה נחושת חומר אסטרטגי מוגבל — דרושה לתחמושת, מנועים וציוד צבאי.

הפתרון היה יוצא דופן לחלוטין: משרד האוצר של ארצות הברית השאיל לפרויקט מנהטן כ-14,700 טון כסף טהור. הכסף הותך ויוצר ממנו חוטים לסלילי המגנטים.

לאחר סיום המלחמה פורקו המגנטים, הכסף הוחזר למשרד האוצר וחסרונות קטנים הושלמו בדרכים אחרות.

## U-235 ופצצת הירושימה



פצצת 'U-235 — Little Boy' שהופרד ב-Oak Ridge שימש לפצצה זו, הירושימה 1945

האורניום-235 שהופרד ב-Oak Ridge באמצעות הקלוטרונים שימש לבניית הפצצה הגרעינית Little Boy — פצצה מסוג Gun-type המבוססת על U-235. הפצצה הוטלה על העיר הירושימה ביפן ב-6 באוגוסט 1945, ואחריה נפלה פצצה שנייה (Plutonium) על נגסאקי. האירועים הובילו לכניעת יפן וסיום מלחמת העולם השנייה. כך הפכה טכנולוגיית קרני יונים והפרדת מסות לחלק ממאורע ממשמעות היסטורית עצומה — ומשם החלה דרכה לתעשיית הסמיקונדוקטורים.

### הקשר בין קלוטרון למשתיל יונים

הקלוטרון יצר את התשתית הטכנולוגית הישירה למשתילי היונים. שרשרת הרכיבים:

- מקור יונים → האצה במתח גבוה → הפרדה מגנטית → הובלת קרן → פגיעה ביעד.

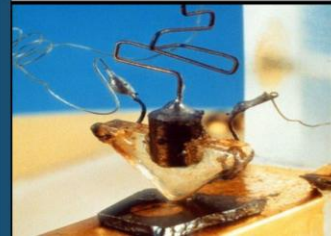
זו בדיוק השרשרת שקיימת גם במשתיל יונים מודרני. ההבדל: במקום לאסוף האיזוטופ המופרד, מחדירים אותו לתוך גביש הסיליקון. לכן:

**משתיל יונים הוא ספקטרומטר מסה הפוך.**

# פרק ג: המעבר לתעשיית הסמיקונדוקטורים

## לאחר המלחמה — פיזיקת חומרים

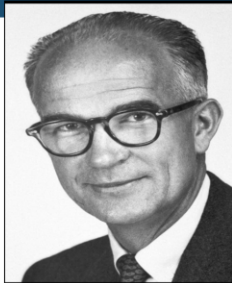
### ויליאם שוקלי — הטורניסטור (Bell Labs, 1947)



הטורניסטור הראשון מגע נקודתי

- Point-Contact Transistor (1947)
- שתי מחטי זהב על גרמניום: בראטיין + ברדין
- ! הגברה → הזרקה נשאים מקומית
- שוקלי — Junction Transistor (1948–51)
- בתוך הגביש PNP / NPN אזורים
- יציב לייצור → הזרקה מבוקרת
- 1956 נובל
- בראטיין + ברדין + שוקלי
- Bell Labs שוקלי עוזב — 1955
- Shockley Semiconductor Lab 1956
- Mountain View / Palo Alto, California
- גיוס הצעירים המוכשרים ביותר
- הבעיה
- מנהל נוראי — גאון פיזיקלי
- חוסר אמון, פוליגרף, חשדנות

### שוקלי — הפטנט הראשון לשתילת יונים בסיליקון (1954)



והשתלת יונים US 2,787,564 פטנט שוקלי (PNP/NPN) הפטנט של ויליאם שוקלי מתאר טורניסטור צומת ( בתוך גביש P-N הוא מסביר איך ליצור אזורי לגבי השתלת יונים

- מודרני Implant אין תיאור של
- אצל US 2,787,564 פטנט
- 'lonic Bombardment' החדרת חלקיקים טעונים ואנרגטיים לתוך החומר המשמעות
- לא תהליך הנדסי מלא
- כן רעיון פיזיקלי מוקדם של:
- Ion Injection / Ion Bombardment

#### 1954 — הרעיון

- US 2,787,564 ויליאם שוקלי הגיש פטנט
- 'Forming Semiconductive Devices by Ionic Bombardment'

#### מה הוא הבין לפני כולם

- ניתן לשלוט במדויק בריכוז ועומק הדופנט
- יותר מדויק — עדיף על דיפוזיה בתנור

#### אבל...

- 1974-פג ב — 1954 הפטנט הוגש
- ! בדיוק כשהשוק המסחרי התחיל להמריא

#### שוקלי לא הרוויח רויאליטי משמעותי →

#### Bell Labs (1952) — רסל אוהל

- ניסויי שתילה ראשונים על דיודות סיליקון
- 60-המצב עד אמצע שנות ה
- שיטת הדופינג הדומיננטית — דיפוזיה בתנור
- עדיין מחקר בלבד — Ion Implantation
- אניל +נזק גבישי לאחר שתילה: הבעיה →

לאחר מלחמת העולם השנייה, מדענים ומהנדסים הבינו שטכנולוגיית קרני יונים אינה שייכת רק לפיזיקה גרעינית ולנשק. כאשר יונים מואצים פוגעים במוצק, הם חודרים לתוך מבנה הגביש ומאבדים אנרגיה בהתנגשויות. תהליך זה — Ion Implantation — מאפשר שינוי מבוקר של תכונות החומר.

## דופינג בסיליקון — הצורך

בתעשיית הסמיקונדוקטורים, דופינג הוא הוספת אטומים זרים (Dopants) לסיליקון כדי לשלוט בתכונותיו החשמליות.

הדופנטים הנפוצים:

| שימוש  | דופנט                    |
|--|--------------------------|
| דופינג מסוג p — יצירת אזורי חורים              | (BF <sub>2</sub> ) Boron |
| דופינג מסוג n — יצירת אזורי אלקטרונים          | Phosphorus (P)           |
| דופינג n כבד — יצירת Source/Drain בטרנזיסטורים | Arsenic (As)             |

שיטת ה-Diffusion המסורתית — חימום פרוסות בנוכחות גזים — הייתה מוגבלת: שליטה גרועה בעומק, פרופיל רחב, ותלות בתהליך תרמי ארוך. Ion Implantation פתרה את הבעיות הללו.

**Peter Rose — חלוץ הענף**

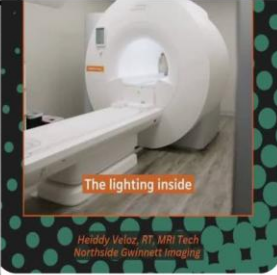
<https://www.youtube.com/watch?v=IHKuex-VSGA>



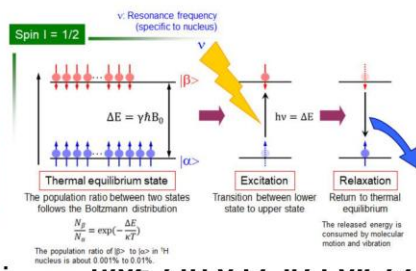
פיטר רוז (Peter Rose) — מייסד (1978) Nova Associates, חלוץ משתילי יונים לסמיקונדוקטורים

אחד האנשים המרכזיים בהפיכת Ion Implantation לטכנולוגיה תעשייתית היה המהנדס Peter Rose. הוא זיהה מוקדם את הפוטנציאל של השתלת יונים לתעשיית הסיליקון. במהלך עבודתו בתחום, איסי גייר פגש את פיטר רוז בפגישה קצרה להיכרות הדדית — מפגש ייחודי עם אחד חלוצי התחום.

## איזידור רבי, פליקס בלוך, תהודה מגנטית, האחים וואריאן MRI ו NMR וקונים את Extrion



Varian Halcyon System



Nuclear magnetic resonance spectrometer  
Varian T60 nuclear magnetic resonance spectrometer; 60MHz continuous wave, with permanent magnet. Made by Varian, Zurich, in 1969

Science Museum Group Collection

פליקס בלוך  
אדוארד פרסל  
תהודה מגנטית (NMR) על פיתוח  
גרעינית  
האחים

### חברת Extrion

פיטר רוז היה מעורב בהקמת חברת Extrion — אחת החברות הראשונות שפיתחו Ion Implanters מסחריים לתעשיית הסיליקון. המשתילים הראשונים היו מבוססים על עקרונות ספקטרומטר מסה:

- מקור יונים.
- האצה במתח גבוה.
- מגנט להפרדת מסות.
- תא השתלה עם פרוסת סיליקון.

### האחים וואריאן משמאל בתמונה MRI ו NMR וקונים את Extrion



### Varian Associates

חברת Extrion נרכשה על ידי Varian Associates — חברה גדולה בתחום ציוד פיזיקה ומדע. תחת Varian פותח דור משתילים נוסף.

Varian DF4 קליטרון לסמיקודקטורס איסי עבד ולמד את Fab 5 Jan 1983 – Sep 1983



## Varian 350

אחת המכונות הנפוצות ביותר שפותחו תחת Varian הייתה ה-350D Varian. מכונה זו שימשה בפאב-8 ירושלים לצד משתיל Nova.



מאפיינים מרכזיים:

- סריקה אלקטרוסטטית של הקרן — בניגוד לסריקה מכנית של Nova.
  - זרמי קרן נמוכים יחסית.
  - שליטה מדויקת מאוד באנרגיה.
  - יציבות קרן גבוהה.
  - מיועד להשתלות מינון נמוך ובינוני.
  - בניגוד ל-Nova, ב-350D הייתה טעינה אוטומטית של פרוסות כבר מלכתחילה.
- ב-350D של Varian, זווית ההשתלה הייתה 7 מעלות קבועה — ללא אפשרות לשינוי. זו הייתה סטנדרט מקובל לצמצום תופעת Channeling. השתלות כבדות בפאב-8 בוצעו ב-Nova ב-0 מעלות — שכן במינונים גבוהים מאוד, הנזק הקריסטלי יוצר שכבה אמורפית בפני עצמה שמונעת Channeling.

## עזיבת Varian והקמת Nova

בשלב מסוים עזב פיטר רוז את Varian. הסיבה המרכזית: רצון לפתח דור חדש של משתילים שיתוכנן מלכתחילה עבור High Current Ion Implantation — זרמי קרן גבוהים לייצור המוני. המשתילים הקיימים לא תוכננו לכך. רוז האמין שנדרש קונספט שונה לחלוטין. בשנת 1978 ייסד רוז את Nova Associates. המטרה: מערכת High Current Production Implantation הראשונה בעולם.



Nova



Nova נרכשה על ידי Eaton Corporation ופעלה כ-Eaton Nova. משתיל Nova הפך לאחד הציודים הנפוצים ביותר לייצור שבבים בשנות השמונים.

בשנת 2000 ביצעה Eaton spin-off של פעילות ציוד הסמיקונדוקטורים שלה. הפעילות הפכה לחברה עצמאית בשם Axcelis Technologies.

Axcelis היא היורשת הישירה של Nova מבחינת טכנולוגיה, צוות פיתוח, וקו המוצרים. היא ממשיכה לפתח ולייצר משתילי יונים עד היום.

שרשרת ההיסטוריה:

| חברה  | תפקיד  |
|---|--|
| Extrion   | שנות ה-70 — משתילים מסחריים ראשונים  |
| Varian Associates<br>Nova Associates (1978)<br>Eaton Nova | רכישת Varian 350D — Extrion ועוד<br>ייסוד ע"י Peter Rose — High Current<br>רכישת Nova — נפוצה בשנות ה-80 |
| Axcelis Technologies (2000)                               | Eaton מ-Spin-off — יורשת Nova  |

## פרק ד: משתיל Nova בפאב-8 ירושלים — עדות טכנית

### ההתקנה — אוגוסט 1984

בשנת 1984 הותקן משתיל יונים מסוג Nova בפאב-8 של Intel בירושלים. חשוב לציין:

- זו הייתה המכונה הראשונה בכלל שהותקנה בפאב-8.
- ההתקנה התבצעה עוד לפני שהחדר הנקי עמד בכל הקריטריונים הסופיים שלו.
- איסי גייר ניהל את ההתקנה יחד עם צוות מהנדסי Eaton Nova.

ניהול ההתקנה כלל: ניהול לוגיסטי, Commissioning של מערכות, בדיקת ביצועים, ואינטגרציה בסביבת המפעל. בשלב בדיקות ה-Commissioning לאחר ההתקנה השתתף גם אלי שביט מפאב-8, שתרם לאפיון הביצועים הראשוניים של המכונה.

### טעינת פרוסות ידנית — כחצי שנה

כאשר המכונה הותקנה, מערכת טעינת הפרוסות האוטומטית עדיין לא הייתה מוכנה. התוכנה של מערכת הטעינה האוטומטית טרם הסתיימה.

לכן, במשך כחצי שנה, בוצעה טעינת הפרוסות באופן ידני:

- תא ההשתלה נפתח לאטמוספירה.
- פרוסות הוכנסו ידנית על הדיסק בעזרת מחזיק ואקום (Vacuum Wand).
- תא ההשתלה נסגר.
- המערכת נשאבה לזואקום.
- רק לאחר מכן החל תהליך ההשתלה.

רק לאחר שהתוכנה הסתיימה ובבדיקה, הותקנה מערכת הטעינה האוטומטית.



הפרוסות בהן עבד הפאב היו פרוסות 6 אינץ' (150 מ"מ). בסוף שנות השמונים זה היה פורמט מתקדם. הדיסק נשא 8 פרוסות 6 אינץ' בו-זמנית.

## מבנה הדיסק ומנגנון הסריקה

הפרוסות הוחזקו על דיסק מסתובב באמצעות הידוק מכאני. בגרסאות מאוחרות יותר שהוצגו על ידי Eaton Nova, פותחו דיסקים ללא תפסנים (Clampless) — שיפרו את אחידות ההשתלה בשוליים.

מנגנון הסריקה של Nova היה מכאני לחלוטין — בניגוד לסריקה אלקטרוסטטית של Varian 350D:

- הדיסק מסתובב סביב צירו ברציפות.
- הדיסק עולה ויורד דרך קרן היונים.

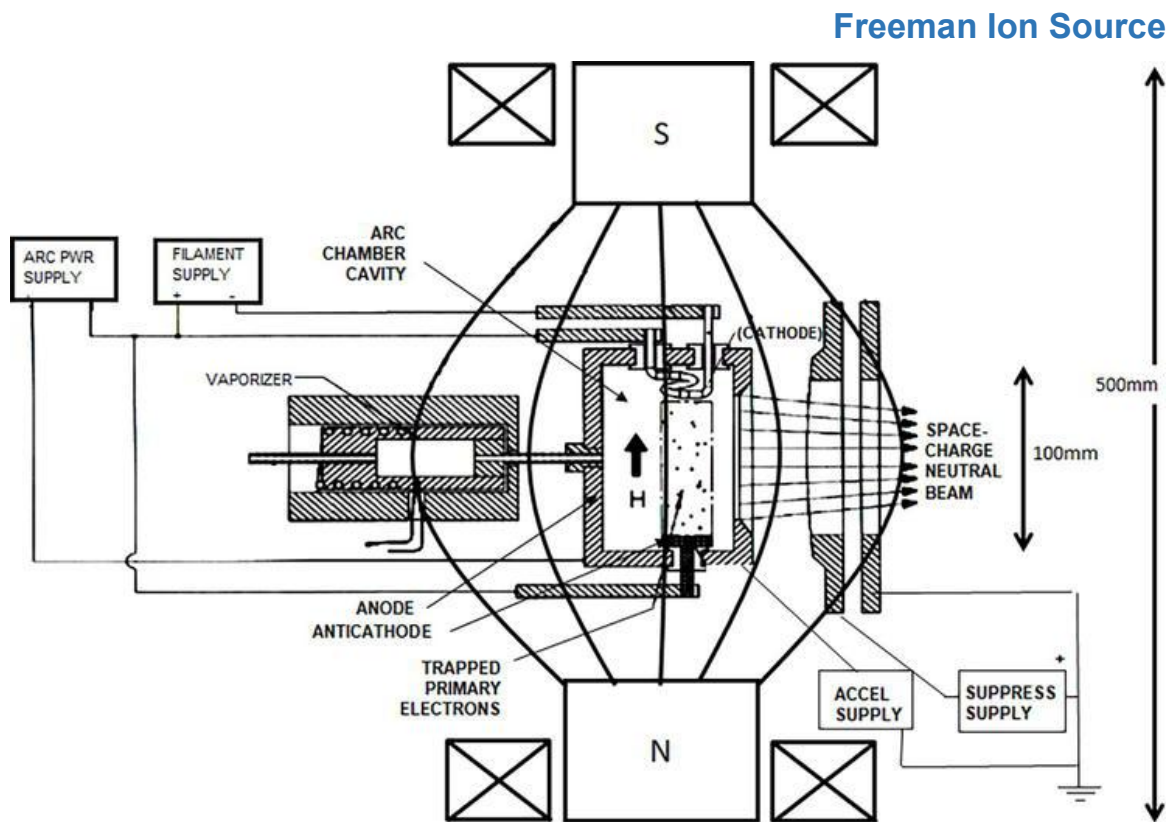
שילוב שתי התנועות יוצר מסלול שבו כל נקודה על הפרוסה עוברת דרך הקרן מספר פעמים. התוצאה — ממוצע של פרופיל הקרן על פני כל הפרוסה, ואחידות מינון טובה.

## הקרן — צרה ולא אחידה

הקרן במכונת Nova הייתה קרן צרה (Pencil Beam). אולם היא לא הייתה אחידה: עוצמתה הייתה גבוהה יותר במרכז הקרן מאשר בשוליה.

תכונה זו הייתה ידועה ומובנת. מנגנון הסריקה המכאני נועד בין היתר לתקן בעיה זו על ידי ממוצע. אולם כל שיבוש בקרן — למשל בשל טעינת פרוסות — גרם לחתימות רדיאליות אופייניות במפות האחידות.

## פרק ה: מקור היונים Freeman ותהליך יצירת הקרן



Harry J. Freeman — פיזיקאי, ממציא Freeman Ion Source; נפגש עם איסי גייר ורוני מן בגילדפורד 1991

מקור היונים במכונת Nova היה מסוג Freeman Ion Source — על שם הפיזיקאי Harry J. Freeman שפיתח אותו.

אירוע היסטורי: בכנס הבינלאומי בגילדפורד, אנגליה, בשנת 1991, פגש איסי גייר את הארי פרימן אישית — מפגש עם האיש שמאחורי אחד הרכיבים המרכזיים של המכונה שבה עבד מדי יום.

### עקרון הפעולה של Freeman Source

Freeman Ion Source — מקור יונים פילמנט-פלזמה, לב מכונת Nova בפאב-8

המקור פועל כך:

- פילמנט (Filament) מחומם פולט אלקטרונים.
- האלקטרונים מואצים במתח ARC ויוצרים Arc current, לדופן התא שדה מגנטי גורם להם תנועה ספיראלית שמגדילה את המסלול שלהן ומעלה את הסיכוי לינון גז.
- האלקטרונים מתנגשים עם אטומי הגז ומייננים אותם.
- נוצרת פלזמה.
- יונים נמשכים דרך פתח היציאה ומואצים לכיוון מערכת ההאצה.

## מקור מוצק עם מאייד — Arsenic

לצורך השתלת ארסן, לא השתמשו בגז Arsine ( $AsH_3$ ) אלא במקור ארסן מוצק עם מאייד (Vaporizer):

- חומר ארסן מוצק הוכנס למאייד.
- המאייד חימם את הארסן עד לאידוי.
- אדי הארסן נכנסו לאזור הפלזמה של המקור.
- האינזימציה נוצרה והקרן יצאה.

שיטה זו הייתה נפוצה לפני השימוש הרחב בגזים מסוכנים. היא דרשה ניהול זהיר של טמפרטורת המאייד לשמירת זרם קרן יציב.

## חיי הפילמנט

אחת הבעיות המוכרות של Freeman Source הייתה אורך חיים קצר של הפילמנט. בתנאי העבודה בפאב-8, חיי הפילמנט היו בדרך כלל:

### כשבע עבודה.

הסיבות לכך:

- הפצצת הפילמנט על ידי אטומים ויונים מהפלזמה — גורמת ל-Sputtering של חומר הפילמנט.
- שחיקה תרמית בטמפרטורות גבוהות.
- תגובות כימיות עם חומרי הדופנט.
- מאמץ טרמי קרע ושבר את הפילמנט

השחיקה הייתה חזקה יותר במרכז הפילמנט — שם צפיפות הפלזמה הגבוהה ביותר — ובסופו של דבר הפילמנט נקרע שם.

## בדיקת יציבות הקרן — Faraday Flag

לפני תחילת כל השתלה, היה צורך לוודא שהקרן יציבה. הדבר בוצע על ידי מדידת זרם הקרן על גבי:

### Faraday Flag — אלקטרודה מוליכה

הקרן פוגעת בדגל ומייצרת זרם חשמלי מדיד. המתנה עד לייצוב הזרם הייתה שלב סטנדרטי לפני תחילת כל השתלה. הדבר היה חשוב במיוחד כאשר השתמשו במאייד — קצב האידוי היה צריך להתייצב ולתת זרם קרן קבוע.

## הוספת White Source

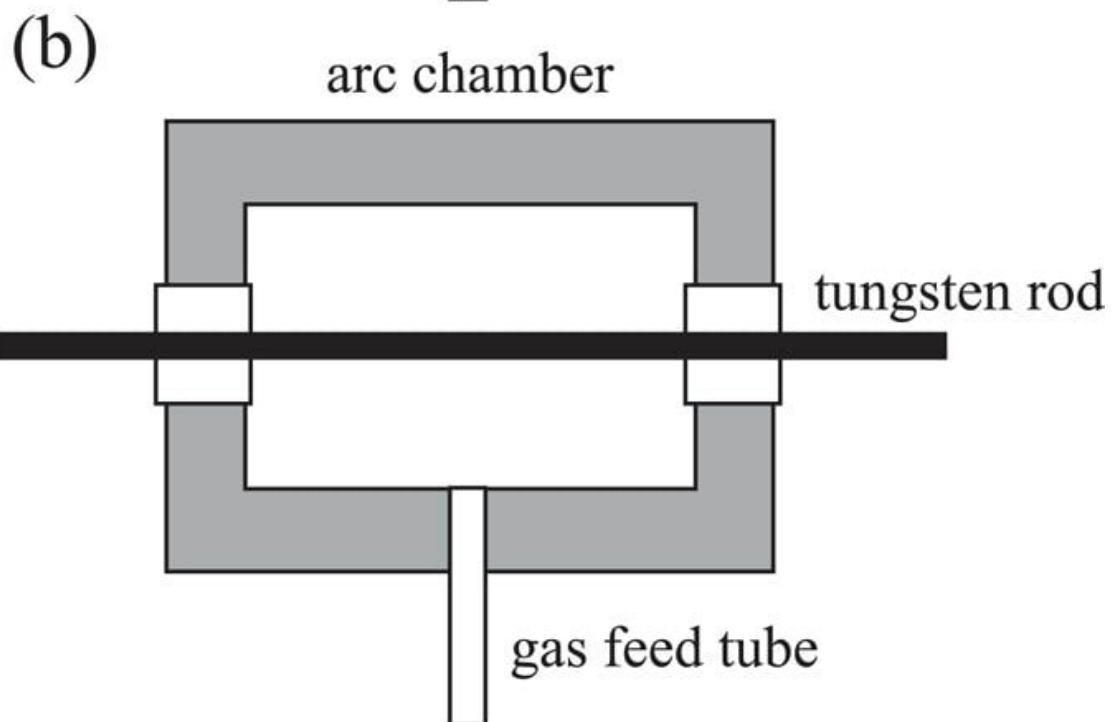
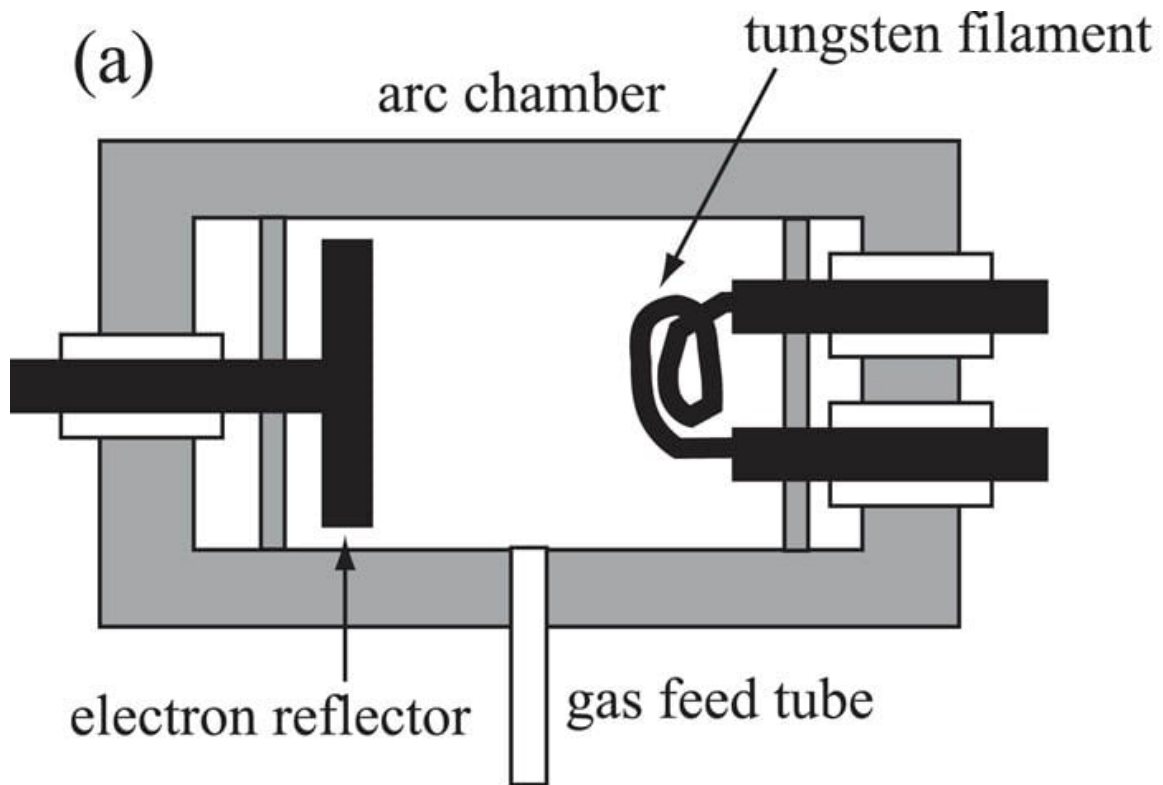
רוני מן ואני ראינו את [Nicholas R White](#) בקונפרנס בגילדפורד 1991, ואיסי פגש אותו גם בנובה, בין שאר ההמצאות שלו, הוא המציא מקור יונים מבוסס על Bernas source השידרוג ניקרא ב white source NOVA



תמונה של Nic White קישור למאמר שלו, ותאור הקריירה שלו

<https://www.researchgate.net/publication/245066041> Ion sources for use in ion implantation

I first learnt of ion implantation from Harry Freeman in 1972 as a student. I later studied ion beam physics for radiocarbon dating, worked at ultra low energy molecular ion beam interactions, then started working in ion implantation for Peter Rose at Eaton Nova. I have worked at all energies from 17 eV to 10 MeV, with positive and negative ions. I have specialized in ion optics, accelerator and magnet design. Pioneered 300mm and broader parallel uniform ribbon ion beams for implantation.



- *white source above freeman source below*

לאחר שנים של עבודה עם Freeman Source, הוכנס מקור יונים מסוג אחר שהציע יתרונות מסוימים בגזרת יציבות וביצועים. הוכנס לשימוש את ה-White Source בפאב-8.

**השתלות שבוצעו**

ב-Nova בפאב-8 בוצעו השתלות של:

|                |                                    |
|----------------|------------------------------------|
| (BF2) Boron    | השתלות מינון נמוך ובינוני — p-type |
| Phosphorus (P) | השתלות n-type — Wells, LDD         |
| Arsenic (As)   | מינון גבוה — Source/Drain של NMOS  |

השתלות ה-Source/Drain היו הכבדות ביותר מבחינת מינון — עד כ- $10^{15}$  יונים/סמ"ר — ושם הופיעו בעיות טעינת הפרוסות בצורה הקשה ביותר.

# פרק ו: Wafer Charging — טעינת הפרוסות

## צוות הפרויקט

- פרויקט אפיון טעינת הפרוסות ופיתוח הפתרון ב-Fab-8 נעשה במסגרת עבודת צוות. בצוות פעלו:
- איסי גיר — מוביל הפרויקט, אפיון הבעיה ופיתוח הפתרון.
  - רוני מן — מהנדס מפאב-8, שלקח חלק פעיל בניסויים ובאפיון התופעה לאורך הפרויקט.
  - מאיר רזוג — חוקר שביצע עבודת מסטר אקדמית על תופעת טעינת הפרוסות בזמן השתלת יונים, ותרומותיו המחקריות שיפרו את ההבנה הפיזיקלית של הבעיה.
  - עוזי תומו — הצטרף לצוות בשלב מאוחר יותר של הפרויקט, והמשיך את העבודה על אפיון ושיפור פתרונות הניטרול.
- עבודת המסטר של מאיר רזוג הוסיפה ממד אקדמי ומחקרי לפרויקט — שילוב נדיר של עבודת ייצור בשטח עם מחקר תיאורטי ומדידות שיטתיות.

## תיאור התופעה

כאשר קרן יונים בזרם גבוה פוגעת בפרוסת סיליקון, היונים הם חלקיקים טעונים חיובית. כאשר שכבות מבודדות על פני הפרוסה מונעות פיזור מהיר של המטען, נוצרת הצטברות מטען חשמלי אלקטרוסטטי חיובי על פני השטח.

## המבנים הרגישים

הבעיה הופיעה בעיקר כאשר הפרוסות כללו:

- Photoresist — חומר מבודד המצפה את הפרוסה בתהליכי ליתוגרפיה.
- Silicon Oxide — תחמוצת בידוד.
- Silicon Nitride — ניטריד בידוד.
- Polysilicon מעל Oxide — מבנה הדומה לשער MOS — רגיש במיוחד.

## מנגנון הפגיעה

### 1. הצטברות מטען

המטען החשמלי מצטבר על פני השכבות המבודדות. הפוטנציאל על פני הפרוסה עולה.

### 2. פגיעה בניטרול הקרן

הקרן עצמה עוברת ניטרול חלקי באמצעות אלקטרונים שנוצרים מתוך המכונה. כאשר הפרוסה נטענת, השדה החשמלי שנוצר מעל הפרוסה מגרש אלקטרונים אלו ומפריע לניטרול.

### 3. התרחבות הקרן — Beam Blow-up

כאשר הניטרול נפגע, הדחייה הקולומבית בין היונים בתוך הקרן עצמה (Space Charge) גוברת. הקרן מתרחבת. חלק מן הקרן נחסם על ידי האפרטורות האופטיות של המכונה.

### 4. שינוי דינמי באחידות

הטעינה והשינוי בקרן הם דינמיים — משתנים לאורך ההשתלה. התוצאה: שינוי לא צפוי במינון על פני הפרוסה.

## ביטוי במפות אחידות

התופעה התבטאה במפות Sheet Resistance של OmniMap בשני דפוסים אופייניים:

- גרדיאנט מרכז-שוליים — מרכז הפרוסה מקבל מינון שונה מהשוליים.
- טבעות רדיאליות — דפוס טבעות סביב מרכז הפרוסה.

לעיתים שני הדפוסים הופיעו יחד — גרדיאנט כולל עם טבעות מעל.

## Gate Oxide Breakdown — פגיעה בשערי טרנזיסטורים

בנוסף לאי-אחידות, הטעינה גרמה לבעיה חמורה יותר: פריצת מתח (Breakdown) בשכבת ה-Gate Oxide של הטרנזיסטורים.

שכבת Gate Oxide דקה מאוד — בעובי ננומטרים בודדים — חשופה לשדה חשמלי גדול הנוצר מטעינת הפרוסה. אם הפוטנציאל עולה מעל ערך מסוים, שכבת ה-Oxide נשרפת ונגרם נזק בלתי הפיך לטרנזיסטור. כשל כזה פוגע ב-Yield.

## הפחתת זרם ל-2 mA — פתרון זמני

הפתרון המיידי לבעיה היה פשוט ואכזרי: הפחתת זרם הקרן מ-10 mA ל-2 mA.  
ב-2 mA:

- שטף היונים הפוגעים בפרוסה קטן משמעותית.
- הצטברות המטען איטית יותר.
- ניטרול הקרן מספיק להתמודד עם הטעינה.
- כמעט ללא עיוות בקרן.

אולם המחיר היה כבד: כדי להגיע לאותו מינון בזרם נמוך פי 5, זמן ההשתלה מתארך פי 5. זה הגביל ישירות את תפוקת המפעל (Throughput) וגרם לצוואר בקבוק בייצור.

# פרק ז': Argon Backfill מול Electron Shower — ויכוח הנדסי

## Argon Backfill — הגישה של אינטל אורגון

קבוצת הפיתוח של Intel באורגון, בראשות המהנדס Mitch Taylor, קידמה פתרון לבעיית Wafer Charging שנקרא Argon Backfill.

### עקרון הפעולה

הרעיון: להכניס כמות קטנה של גז ארגון לתוך תא ההשתלה (End Station), תוך קלקול מבוקר של הוואקים. הגז יעבור יינון חלקי, ויוצרו אלקטרונים באנרגיה נמוכה שינטרלו את המטען על הפרוסה.

### הבעיה המרכזית בסביבת ייצור

איסי גייר לא האמין שהשיטה תעבוד בצורה אמינה בתנאי High Volume Manufacturing, ויכח על כך עם Mitch Taylor. הסיבה הפיזיקלית:

- בסביבת ייצור אמיתית, פרוסות רבות עם Photoresist עוברות בכל יום דרך המכונה.
  - ה-Photoresist מתפרק חלקית בזמן ההשתלה ויוצר פולימרים.
  - הפולימרים המבודדים נדבקים לקירות תא ההשתלה.
  - קירות מצופים בפולימר מבודד פולטים כמות קטנה בהרבה של אלקטרונים משניים (Secondary Electrons).
  - לכן, הגז הארגון אינו מקבל מספיק אלקטרונים ואינו יכול לנטרל את המטען ביעילות.
- המסקנה: השיטה יכולה להיראות יעילה בניסוי מעבדה על מכונה נקייה, אך בייצור רצוף — הקירות מתכסים מהר והשיטה הופכת ללא יציבה.

## Electron Shower — הפתרון

מערכת Electron Shower למשתיל Nova — הוכנסה בפאב-8 ע"י איסי גייר עם מעגל סגור

הפתרון שאיסי גייר הוביל ויישם בפאב-8 היה מערכת Electron Shower. הטכנולוגיה הייתה מבוססת על פטנט של חברת Hughes. עם פקיעת הפטנט, ניתן היה לשלב את הטכנולוגיה ביצור אבל אפשר לעשות ניסויים וזה ניקרא באינטל ובפאב 8 בשם הקוד הסודי Nova B mode פטנט מקורי של Hughes 1967

<https://patents.google.com/patent/US3507709A/en>

Fab8 היה הראשון באינטל שאפיין והכניס לשימוש Electron Shower במשתיל Nova. פטנטים של EATON NOVA

<https://patents.google.com/patent/US5164599A/en>

<https://patents.google.com/patent/US4804837A/en>

### עקרון הפעולה

מערכת Electron Shower מייצרת ישירות אלקטרונים באנרגיה נמוכה ומזרימה אותם לפני הפרוסה. האלקטרונים מנטרלים את המטען החיובי המצטבר. בניגוד ל-Argon Backfill, ה-Electron Shower:

- מספק אלקטרונים ישירות — אינו תלוי בתנאי הקירות.
- עובד גם כשהקירות מצופים בפולימר.
- יציב ומבוקר.

- ניתן לכיוון ולכיוול.

### מעגל סגור — מדידת זרם הדיסק

הנקודה המרכזית ביישום של איסי גייר: המערכת לא עבדה Open Loop (עם כמות אלקטרונים קבועה). היא עבדה במעגל סגור (Closed Loop):

- זרם הדיסק (נושא הפרוסות) נמדד בזמן אמת.
- המדידה מייצגת את המטען הכולל המצטבר.
- מנגנון הבקרה מכוון את שטף האלקטרונים בהתאם.

### נקודת העבודה האופטימלית

איסי גייר מצא כי נקודת העבודה האופטימלית אינה ניטרול מוחלט (זרם נטו = 0), אלא:

#### עודף קטן של אלקטרונים.

הסיבה: אפס מוחלט הוא נקודה לא יציבה. כל תנודה קטנה דוחפת לכיוון חיובי ומחדשת טעינה. עודף קטן של אלקטרונים נותן מרווח ביטחון (Margin) לייצור יציב.

### ניסויי הכיול — פרוסות Polysilicon על Oxide

לצורך אפיון וכיול מערכת ה-Electron Shower, איסי גייר השתמש בפרוסות מוניטור מיוחדות: מבנה הפרוסה:

- סיליקון (Substrate)
- שכבת Silicon Oxide
- שכבת Polysilicon אחידה ורציפה (ללא דפוסים)

בחירה זו הייתה מחושבת: מבנה Si/SiO<sub>2</sub>/Poly מדמה מצב רגיש לטעינה (דומה לשער MOS), אך ללא מורכבות של פרוסת מוצר מלאה עם גיאומטריות ומבנים שונים. הדבר אפשר ניסויים מבוקרים.

שלבי הכיול:

- ביצוע השתלה בתנאים שונים של זרם אלקטרונים.
- Flash Anneal לפרוסות המוניטור במערכת AG Associates — עם מנורת קוורץ, ~1000°C.
- מדידת Sheet Resistance ב-OmniMap.
- ניתוח מפת האחידות — זיהוי שיפורים.
- איטרציה של הפרמטרים.

מאיר ואני הינו לוקחים פרוסות ממנות הנדסה, משתילים בתנאים שונים, ולוקחים לפריסורט. שם מאיר של טרנסיסטורים פוליסייליקון, והינו רואם איזה מהם gates לחת מיקרוסקופ היה נוגע עם פרוב מחט ב ניפרץ מהטעינה בהשתלה. רוני מן ומאיר רזווג פיתחו מוניטור קבלים והציגו את המוניטור בכנס טכנולוגי.

# פרק ח: ניסוי Penny Detector ב EATON NOVA

## הצורך — מדידה בזמן אמת

כדי להבין לעומק את תופעת ה-Wafer Charging ולכייל את מערכת ה-Electron Shower בצורה מדויקת, היה צורך למדוד את המטען על הדיסק בזמן ההשתלה עצמה — בזמן אמת, תוך כדי תנועה. הניסוי ההיסטורי נעשה באיטון נובה

## מדוע נקרא Penny Detector

הניסוי נקרא Penny Detector — ולא כינוי בלבד. בניסוי שימש בפועל: מטבע Penny אמריקאי אמיתי כאלקטרודה לקליטת המטען. המטבע הותקן על הדיסק המסתובב.

## מבנה מערכת המדידה

המערכת כללה:

- מטבע Penny שהשמש כאלקטרודה קולטת מטען.
  - מחשב קטן שהותקן על הדיסק המסתובב עצמו.
  - מעגל מדידה שחיבר את Machina Metan.
- כל המערכת הייתה צמודה לדיסק — מסתובבת ועולה-יורדת יחד איתו בזמן ההשתלה.

## תהליך הניסוי

- הדיסק עם הפרוסות, המטבע והמחשב הוכנסו לתא ההשתלה.
- בוצעה השתלה בתנאים רגילים.
- המחשב על הדיסק רשם את זרם המטען לאורך כל ההשתלה.
- לאחר סיום ההשתלה — הוצא הדיסק.
- הנתונים הועברו מהמחשב לניתוח.

## מה נמצא

הניסוי הוכיח שהטעינה היא תופעה דינמית:

- המטען משתנה לאורך ההשתלה.
- יש תלות במיקום על הדיסק.
- יש תלות בתנאי הקרן (זרם, אנרגיה).
- ה-Electron Shower משנה באופן ניכר את המטען.

לאחר מכן בוצע אותו ניסוי עם פרוסה עם קבלים, מצורף מאמר, את Gordon Angel רוני ואני פגשנו והיתיעצנו איתו.



Charging\_measurement\_and\_control\_in\_h

# פרק ט: מדידות אחידות ואפיון תהליך

## OmniMap — Four-Point Probe

מערכת המדידה המרכזית לאחידות ההשתלה הייתה:

### OmniMap — Four-Point Probe

המערכת מודדת את ה-Sheet Resistance (Rs) בנקודות רבות על פני הפרוסה. ה-Rs קשור ישירות למינון ולאקטיבציה של הדופנט.

מדידות בוצעו ב:

### 121 נקודות על פרוסת 6 אינץ'

הנקודות פרוסות בצורה סדורה על פני כל הפרוסה. התוצאה — מפת אחידות מלאה (Uniformity Map).

## מה ניתן לראות במפה

מפת ה-Rs מאפשרת זיהוי:

- גרדיאנטים רדיאליים — מרכז שונה מהשוליים.
- טבעות — דפוס מינון מחזוריים.
- עיוותים לא סימטריים — מצביעים על בעיות בסריקה.
- שינויים לפי כיוון — מצביעים על Misalignment.

## Flash Anneal — AG Associates

לפני מדידת ה-Rs, פרוסות המוניטור עברו תהליך Anneal מהיר:

- מערכת: AG Associates Flash Annealer.
- אנרגיה: מנורת קוורץ (Quartz Lamp).
- טמפרטורה:  $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ .
- משך: קצר מאוד (Flash).

מטרת ה-Anneal: הפעלת הדופנטים (Electrical Activation) — מעבר הדופנטים ממיקומים אינטרסטיציאליים לגביש לסאבסטיטוציאליים (פעילים חשמלית). ללא Activation, מדידת Rs אינה מייצגת את המינון האמיתי.

## SIMS/CIMS — פרופיל עומק

לצורך מדידת פרופיל עומק ההשתלה, נעשה שימוש בטכניקת SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) בגרסת CIMS.

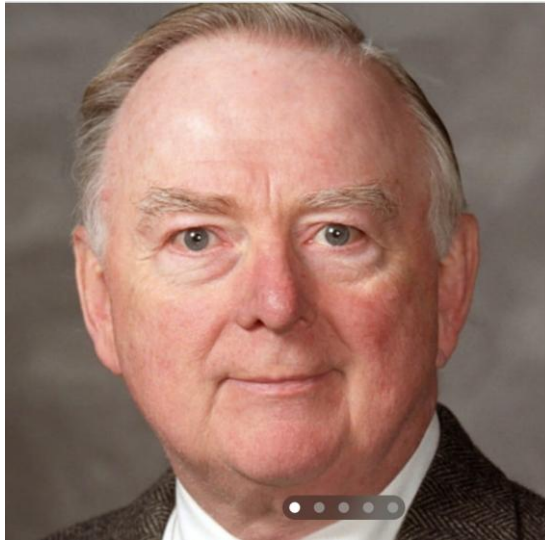
לא היה ציוד SIMS בפנים הפאב. לכן פרוסות נשלחו לבדיקה חיצונית:

- טכניון — לפרופסור קליש — אחד מהחוקרים הבולטים בישראל בתחום פרופילי השתלה.
- לאוניברסיטאות באורגון.

הבדיקות סיפקו:

- פרופיל ריכוז הדופנט כפונקציה של עומק.
- Projected Range (Rp) — עומק ממוצע.
- Straggle ( $\Delta Rp$ ) — סטיית ההתפלגות.
- Channeling Tail — זנב ריכוז בעומק גדול.

## פרק י: סימולציה — TRIM90 ופרופסור זיגלר



## James F. Ziegler

**James F. Ziegler was an American physicist and computer scientist best known for developing the TRIM and SRIM simulation programs. These tools became global standards for modeling the penetration of ions into matter, foundational to semiconductor device fabrication, materials science, and radiation damage research.**

### מה זה TRIM90

TRIM90 היא תוכנת סימולציה המבוססת על שיטת Monte Carlo לדמיון תנועת יונים בחומר מוצק. השם TRIM — Transport of Ions in Matter.

התוכנה מחשבת:

- Projected Range ( $R_p$ ) — עומק ממוצע של חדירת היונים.
- Straggle ( $\Delta R_p$ ) — סטייה סטטיסטית של עומק החדירה.
- פרופיל התפלגות הדופנט בגביש.
- השפעת זווית ההשתלה (Tilt Angle).
- Channeling — בצורה חלקית.

### שיטת Monte Carlo

Monte Carlo מדמה מסלולים של יונים בודדים בתוך הגביש. כל יון 'מוגרל' — כלומר, בכל התנגשות נוצרת סטייה אקראית לפי התפלגות הסתברות פיזיקלית. עבור אלפי יונים, ממוצע ההתפלגות מתכנס לפרופיל הדופינג האמיתי.

### קבלת התוכנה מפרופסור זיגלר

בכנס הבינלאומי בגילדפורד, אנגליה, בשנת 1991, פגשו איסי גייר ועמיתיו את פרופסור זיגלר שפיתח תוכנות סימולציה בתחום.

פרופסור זיגלר מסר לאיסי ורוני את תוכנת TRIM90 על גבי דיסקט (Floppy Disk). זו הייתה הדרך הטיפוסית להפצת תוכנות לפני עידן האינטרנט — מיד ליד, כנסים ועידות.

התוכנה הורצה על:

- מחשב אישי מסוג Intel 80386.
- מעבד מתמטי (FPU) מסוג Intel 80387.

ה-387 היה הכרחי: סימולציית Monte Carlo דורשת כמויות גדולות של פעולות חישוב נקודה צפה (Floating Point). בלי ה-387, הסימולציה הייתה איטית מכדי להיות שימושית. עם ה-387, הסימולציה רצה בזמן סביר. הינו מריצים על המחשב לפני שהלכנו הביתה מהעבודה ובוחנים את התוצאה בבוקר.

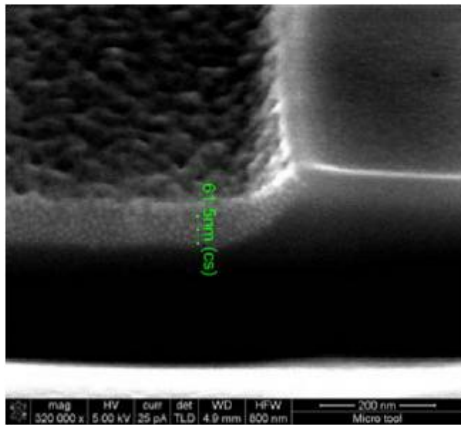
### מטרת השימוש בפאב

חשוב להבהיר: השימוש ב-TRIM90 בפאב-8 לא היה לפיתוח תהליכים חדשים. לאינטל פיתוח היו כלי סימולציה מתקדמים בהרבה.

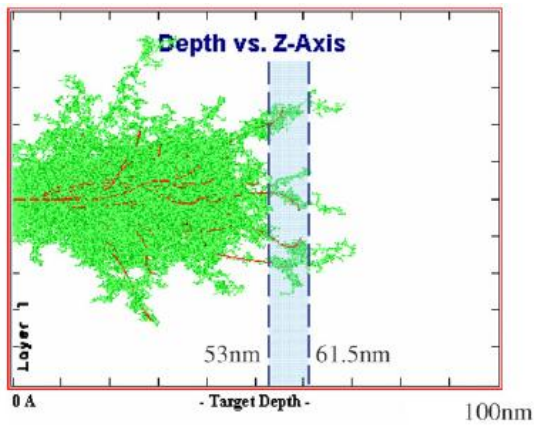
השימוש היה:

- אימות פרמטרים של תהליך קיים.
- בדיקה שהאנרגיה שנבחרה נותנת עומק נכון.
- השוואה בין תוצאות הסימולציה למדידות CIMS.
- הבנה פיזיקלית מהירה של שינויי אנרגיה או מינון.

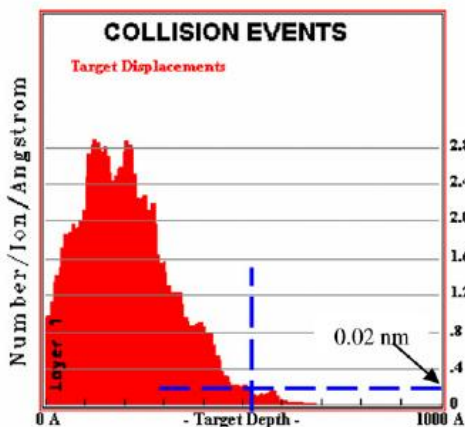
תמונות "בצל" של הסימולציה



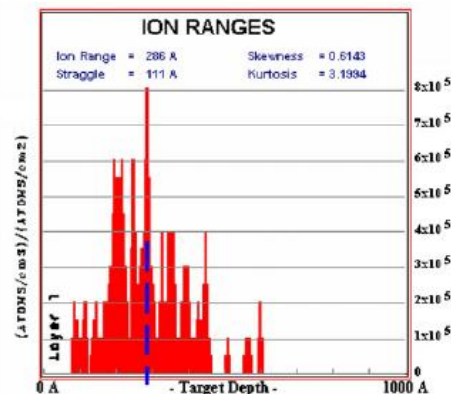
(a)



(b)



(c)



(d)

# פרק יא: אוטומציה — SECS-II ו-Station Controller

## הצורך — מניעת Mis-Processing

בייצור המוני, בחירה שגויה של מתכון השתלה (Recipe) עלולה להרוס אצווה שלמה של פרוסות. כאשר המכונה מופעלת ידנית, קיים סיכון אנושי למשגה. לכן פותחה מערכת אוטומציה.

## Station Controller — מבנה ותפקיד

איסי גייר יזם ופיקח על פיתוח מערכת Station Controller עבור משתיל היונים. המערכת:

- פועלת על מחשב UNIX.
- מחוברת ישירות למשתיל היונים.
- מחוברת למחשב הייצור המרכזי של המפעל (Host Computer).

תפקיד המערכת:

- קבלת נתוני מנת הייצור (Lot Data) מה-Host.
- זיהוי סוג ושלב התהליך.
- בחירה אוטומטית של מתכון ההשתלה (Implant Recipe) המתאים.
- טעינת המתכון למכונה.
- מניעת מצב שבו מפעיל בוחר מתכון שגוי.
- ניהול ועריכת recipes וטעינה שלהם למכונה, כולל גיבוי, ושמירה של נתוני השתלה של כל 8 פרוסות שהושתלו, והמנה כולה.

## תהליך הפיתוח

איסי גייר ניהל את הפיתוח:

- הגדרת הדרישות ההנדסיות המדויקות.
- עבודה עם מתכנת לפיתוח הקוד.
- ביצוע בדיקות הפעלה (Commissioning Tests).
- איתור ותיקון באגים (Debugging) יחד עם המתכנת.
- אינטגרציה עם מערכות המפעל.

## פרוטוקול SECS-II

החיבור ל-Host Computer בוצע בפרוטוקול:

### SECS-II — SEMI Equipment Communication Standard

זהו תקן תעשייתי שפותח ע"י ארגון SEMI לתקשורת בין ציוד ייצור למערכות בקרה מרכזיות. איסי גייר ומתכנת המערכת יישמו את הפרוטוקול לחיבור הספציפי של Nova ל-Host. משתיל ה-Nova בפאב-8 היה בין המכונות המוקדמות שחוברו ל-Host Computer בסטנדרט SECS-II.

## חשיבות האוטומציה

מניעת Mis-Processing היא אחת מבעיות הייצור הקריטיות. עצם הגדרת מתכון שגוי — אנרגיה שגויה, מינון שגוי, או דופנט שגוי — גורמת לנזק בלתי הפיך לפרוסות ולאבדן כספי משמעותי. המערכת ביטלה את הסיכון האנושי הזה.

# פרק יב: הכנס בגילדפורד, 1991 — מגעים בינלאומיים

## הכנס הבינלאומי

בשנת 1991 השתתפנו בכנס בינלאומי בנושא Ion Implantation Technology שנערך בגילדפורד, אנגליה. לו השתתפו איסי גייר, רוני מן מפאב-8 ירושלים, ורון ריינהרט (Ron Reinhart) מאינטל אורגון. הכנס כלל:

- הרצאות על תהליכי השתלה מחברות ואוניברסיטאות רבות.
- הצגות ציוד ומכונות.
- דיוני תהליך ועדכוני טכנולוגיה.

## מצגות מהנדסים יפניים

חלק ניכר מהמצגות הוצגו על ידי מהנדסים ומדענים מיפן. יפן הייתה בשנים אלו ממעצמות תעשיית הסמיקונדוקטורים. החברות היפניות — NEC, Toshiba, Hitachi, Fujitsu — השקיעו רבות במחקר ופרסמו עבודות נרחבות.

אתגר שעלה: האנגלית של חלק מהמרצים היפניים הייתה קשה להבנה, מה שהקשה על הפקת תועלת מחלק מההרצאות.

## תסכול — היעדר דיון ב-Wafer Charging

על אף שכנס איכותי וחשוב, נושא אחד שהיה בעל חשיבות מרכזית בעבודה בפועל כמעט ולא הופיע:

### Wafer Charging — טעינת פרוסות בזמן השתלה.

הדבר היה מאכזב מאוד. בסביבת High Volume Manufacturing, טעינת הפרוסות הייתה אחת הבעיות הקשות ביותר. אך הכנסים נוטים להתמקד במחקר אקדמי ובפיתוח תהליכים — לא בבעיות ייצור ספציפיות.

הפער בין עולם הפיתוח לעולם הייצור בא לידי ביטוי כאן בצורה ברורה.

## פגישה עם Harry Freeman

במהלך הכנס זכו איסי ורוני לפגוש את Harry J. Freeman — הפיזיקאי שפיתח את Freeman Ion Source שנשא את שמו, ושהיה הלב של מקור היונים במשתיל Nova שבו עבד.

פגישה זו, עם האיש מאחורי הטכנולוגיה המרכזית, הייתה בעלת חשיבות אישית ומקצועית.

## קבלת TRIM90

אחד הדברים המשמעותיים שקרו בכנס: פגישה עם פרופסור זינגר ממנו קיבלנו את תוכנת TRIM90 על גבי דיסקט — ישירות מהמפתח.

# פרק יג: סיכום — שרשרת ההתפתחות ותרומות עיקריות

## שרשרת ההתפתחות ההיסטורית

| שנה/תקופה                  | אבן דרך  |
|----------------------------|--|
| 1931<br>מלחמת העולם השנייה | ארנסט לורנס — הציקלוטרון, ברקלי<br>קלוטרון — Oak Ridge, Racetrack, הפרדת U-235 |
| 1945                       | פצצת הירושימה — Little Boy מ-U-235   |
| שנות ה-50-60<br>שנות ה-70  | מעבר להנדסת חומרים — Ion Implantation<br>Extrion, Varian, 350D — שוק ראשוני    |
| 1978                       | Nova — High Current מייסד Peter Rose   |
| 1984                       | התקנת Nova הראשונה בפאב-8 ירושלים  |
| 1984-1995                  | 11 שנות עבודה — Electron Shower, SECS-II, Penny Detector                       |
| 2000                       | Eaton Nova הופכת ל-Axcelis Technologies  |

## הקשר הישיר: ממנהטן לסיליקון

אחת המסקנות ההיסטוריות המרתקות היא הקשר הישיר בין פרויקט מנהטן לבין תעשיית הסמיקונדוקטורים:

- אותה טכנולוגיה בסיסית — מקור יונים, האצה במתח גבוה, הפרדה מגנטית.
- אותם עקרונות פיזיקליים — הפרדת מסות, beam optics.
- מטרה שונה לחלוטין — מהפרדת איזוטופים ליצירת טרנזיסטורים.

## תרומות עיקריות מפאב-8

ניסיון העבודה בפאב-8 תרם לתחום בכמה צורות:

### Electron Shower

הינו הראשונים באינטל שאפיינו והכניסו לשימוש מערכת Electron Shower במשתילי Nova, תוך דחיית גישת Argon Backfill שקידם Mitch Taylor מאורגון. הפתרון — מעגל סגור עם מדידת זרם דיסק — הפך לשיטה יציבה לייצור גבוה.

### SECS-II ו-Station Controller

פיתחנו מערכת אוטומציה שחיברה את המשתיל ל-Host Computer, ביטלה Mis-Processing ושיפרה את אמינות הייצור.

### אפיון Wafer Charging

הבנה מעמיקה של תופעת הטעינה — ביטויה, גורמיה, ומדידתה (כולל ניסוי Penny Detector).

### שיתוף פעולה עם Eaton Nova

קשר דו-כיווני עם קבוצת הפיתוח הוביל לשיפורים ספציפיים שהוטמעו ישירות בפאב.

## הפער שנחשף

אחד הלקחים הכלליים של ניסיון זה: הפער בין עולם הפיתוח לעולם הייצור. כנסים ופרסומים עסקו בתהליכים 'נקיים' בתנאי מעבדה. אך בפאב:

- קירות המכונה מתכסים בפולימר.
- טעינת פרוסות משנה את הקרן בצורה דינמית.
- ניטרול אלקטרונים חייב להיות יציב ומבוקר.
- כל שיבוש קטן — גרדיאנט ב-Rs, טבעת באחידות — מצביע על בעיה מהותית. פתרונות רבים שנחשבים 'בסיסיים' היום נולדו בדיוק מניסיון ייצורי כזה — מהשטח, לא מהמעבדה.

© איסי גייר — כל הזכויות שמורות | מאמר זה מבוסס על ניסיון מעשי ממקור ראשון

## אודות המחבר — ביוגרפיה מקצועית

### תפקיד ותחום עיסוק

איסי גייר היה מהנדס ציוד ותהליכים (Equipment and Process Engineer) בתעשיית המוליכים-למחצה. במשך 11 שנים עבד בתחום השתלת היונים (Ion Implantation) במפעלי Intel, ובעיקר בפאב-8 בירושלים. עבודתו שילבה היבטים של הנדסת ציוד — תחזוקה, התקנה, אפיון ותיקון תקלות — עם היבטים של הנדסת תהליך, כולל אפיון אחידות השתלה, פיתוח שיטות מדידה ופתרון בעיות ייצור ואטומציה.

### הכשרה ותקופת Training בארצות הברית

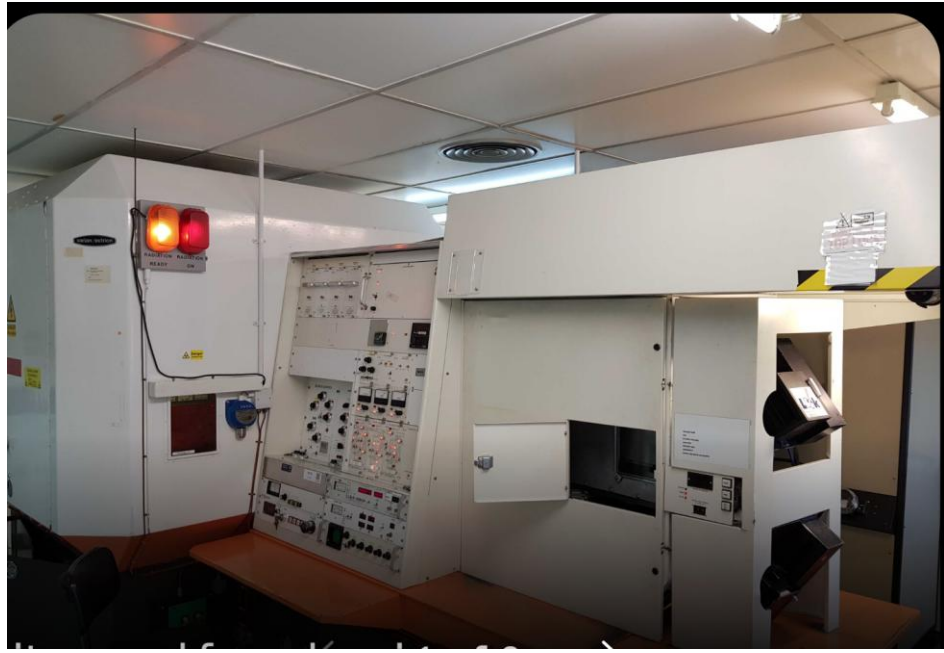
תקופת ה-Training של איסי גייר בארצות הברית כללה שלושה שלבים עיקריים, שביחד בנו בסיס הנדסי רחב ועמוק לפני חזרתו לישראל.

- תחזוקה מקיפה של מכונת ה-Ion Implanter.
  - איתור ותיקון תקלות מכניות, אלקטרוניות ואופטיות.
  - הפעלת המכונה בתנאי ייצור אמיתיים.
  - הבנה עמוקה של התנהגות המכונה בסביבת High Volume Manufacturing.
- העבודה בפאב-7 הייתה בעיקר בתחום תחזוקה ותיקון תקלות — לא פיתוח תהליך — אך היא סיפקה בסיס מעשי חיוני לשלבים הבאים.

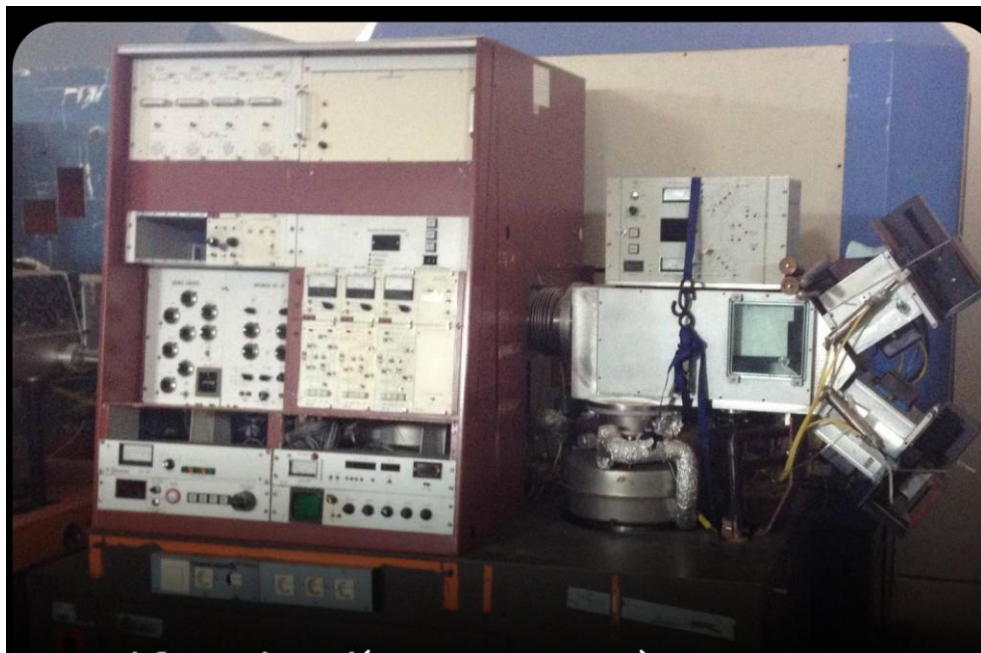
### שלב א' — פאב-5, אורגון (ינואר 1983, כ-9 חודשים)

(~1976) Varian DF-4 Ion Implanter — המשתיל בו עבד איסי גייר בפאב-5, אורגון (ינואר 1983)

בינואר 1983 החל איסי גייר את תקופת ה-Training שלו בפאב-5 של Intel באורגון. שם עבד במשך כתשעה חודשים על משתילי יונים מסוג Varian DF4 — דגם מוקדם ונפוץ של Varian Associates לאותה תקופה. עבודה זו הכניסה אותו לעולם ה-Ion Implantation בייצור אמיתי: תחזוקה, תיקון תקלות ועבודה עם ציוד בסביבת פאב פעיל. בפאב 5 היה פרוטוטייפ מיספר 4 של נובה, שלא הצליחו להפעיל אותו, ונאמר לי שאני צריך ללמוד אותו, עברנו לנו מקסיקו לפאב 7 שם כבר היתה מכונה שסימה התקנה.



Varian DF4



שלב ב' — פאב-7, אלבוקרקי, ניו מקסיקו



Eaton Nova NV-10/80 High Current Ion Implanter פאב-7 אלבוקרקו ופאב-8ירושלים

לאחר פאב-5 באורגון עבר איסי גייר לפאב-7 של Intel באלבוקרקו, ניו מקסיקו. שם שימש כ-Tool Owner של משתיל יונים מסוג Nova 10-80 — הדגם שלימים הותקן גם בפאב-8 בירושלים. תפקיד ה-Tool Owner כלל אחריות מקיפה על המכונה: הפעלה, תחזוקה, תיקון תקלות ועבודה שוטפת בסביבת ייצור. בנוסף עבד בפאב-7 גם על משתילי Varian 350D לזרם בינוני, וצבר היכרות מעמיקה עם שתי הפלטפורמות העיקריות שבהן נעשה שימוש לימים בפאב-8. עבודתו בפאב-7 הייתה בעיקר בתחום תחזוקה ותיקון תקלות.

Varian 350 D



### שלב ג' — ביקור אצל Eaton בבוסטון, יוני 1984

ביוני 1984, לקראת סיום תקופת ה-Training ולפני חזרתם לישראל, נסעו איסי גייר ואלי שביט למפעל Eaton בבוסטון. שם בדקו ואימתו את מכונת ה-Nova 10-80 שיועדה לפאב-8 — ביצוע Acceptance Test למכונה — לפני משלוחה לירושלים. ביקור זה היה שלב קריטי: הוא אפשר לוודא שהמכונה עומדת במפרטים עוד טרם הגיעה לחדר הנקי, וסיפק הכרות אישית מעמיקה עם המכונה הספציפית שהיה עליהם להתקין. בסמוך לאחר מכן חזרו השניים לישראל וניהלו את התקנת המכונה הראשונה בחדר הנקי של פאב-8.

### קורסים אצל Eaton Nova בבוסטון

במסגרת ההכשרה השתתף איסי גייר בקורסים מקצועיים בחברת Eaton Corporation בבוסטון — יצרן משתילי Nova. הקורסים התמקדו בתחזוקה מקיפה של המכונה ובלימוד מעמיק של כל מערכותיה:

#### מערכות פיזיקליות

- מקור היונים (Ion Source) — מבנה, פעולה, תחזוקה.
- מערכת האצה במתח גבוה (High Voltage Acceleration).
- מגנט הפרדת מסות (Mass Analyzing Magnet).
- אופטיקת הקרן (Beam Optics).
- תא ההשתלה (End Station).

#### מערכות אלקטרוניות

- ספקי מתח גבוה — תפעול ותחזוקה.
- מערכות מדידת זרם הקרן (Faraday Cup systems).
- מערכות בקרה של הקרן.

- מערכות ניטור מצב המכונה.

### מערכות מחשוב ובקרה

- מחשב הבקרה של המכונה.
- תוכנות ההפעלה.
- ממשקי המשתמש.
- מערכות ניטור תהליך.
- הגנה על מחשבי הבקרה מפני Voltage Spikes הנוצרים ממקורות המתח הגבוה.

### קשר עם מהנדסי הפיתוח של Eaton Nova

- לאחר ההכשרה, איסי שמר על קשר מקצועי רציף עם מהנדסי הפיתוח והפיזיקאים של Eaton Nova. הוא ביקר פעמים רבות במרכז הפיתוח של החברה. הקשר היה דו-כיווני:
- מהנדסי הפיתוח והפיזיקאים הציגו בפניו שיפורים ושדרוגים — בתוכנה, בחומרה, ובמכניקה.
- איסי גייר העביר מידע מניסיון הייצור: תקלות, דפוסים בעיות, צרכים שלא נפתרו בפיתוח. השיפורים שהוצגו הוטמעו ישירות בפאב-8. בין השיפורים שנדונו ויושמו:
- שיפורי תוכנה — הגנה מפני Voltage Spikes שהשפיעו על מחשבי הבקרה.
- שדרוגי מערכת Electron Shower.
- מעבר מטעינה ידנית של פרוסות בדיסק עם vacuum wand לטעינה אוטומטית עם מטען AT4 דרש הרבה עדכוני תוכנה ושיפורים מכניים, הניסויים בשטח אצל הלקוח היו ב FAB8 ומשם התוצאות נישלחו למהנדסי אוטומציה ותוכנה של NOVA EATON היתי מקבל כל חודשיים EPROM חדשים עם תוכנה מעודכנת
- מקור יונים חדש white source

### תרומות עיקריות בפאב-8

- בין השנים 1984–1995 בפאב-8 ירושלים, איסי גייר:
- ניהל את התקנת משתילי Nova הראשון בפאב — המכונה הראשונה שהותקנה במפעל כולו.
- הוביל את הצוות באינטל שאפיין והכניס לשימוש מערכת Electron Shower במשתילי Nova.
- הוביל פיתוח ויישום שיטת כיול מבוססת מדידות Rs לאפיון אחידות השתלה.
- ניהל את פיתוח Station Controller מבוסס UNIX לחיבור המכונה ל-Host בפרוטוקול SECS-II.
- ניהל ביקורים במרכז הפיתוח של Eaton Nova והחליף מידע טכני קריטי.
- השתתף בכנסים בינלאומיים בתחום Ion Implantation.
- יחד עם איסי, הצטרפו אילן ברמן שהיה במקביל בפאב4 באורגון ועבד על משתילי יונים ומכונות נוספות, והתקין את מכונת הווריאן 350D. זאב לידור ז"ל שהגיע יותר מאוחר לפאב 7, והאנשים שגויסו בארץ, רון כהן, בוריס פלישר, גיורא זכריה, אריה משה, אהרון גנוניאן, אהרון בר, מנו קלישר, נועם ברזילי, רוני קרו, מיכאל מרכוס, ועוד רבים וטובים. לתהליך אלי שביט, מנחם חורב, גבריאלה, רוני מן, בועז וינפלד, יחזקאל גלבר, עוזי תומו.