

## מעבדה למיקרוסקופ אלקטרוני סורק (SEM)

### מטרת המעבדה:

1. הבנת עקרונות קבלת תמונה ב- SEM . הבנת עקרונות קבלת קונטרסט ב- SE וב- BE אלקטרונים.
2. הבנת הגורמים המשפיעים על כושר הפרדה של SEM.
3. הבנת עקרונות פעולתו של מיקרו-אנלייזר מסוג WDS ו- EDS. הבנת הגורמים המשפיעים על כושר ההפרדה באנליזת יסודות.
4. איפיון, באמצעות ה- SEM, של פני שבר מסוגים שונים (ראה נספחים 1-3: שבר משיך, שבר פריך ושבר התעייפות).

### א.ה.ק.ד.מ.ה

במיקרוסקופ אלקטרוני משתמשים בקרן אלקטרונים, אשר מואצים בשדה חשמלי במתח גבוה. עדשות אלקטרו-מגנטיות ממקדות את קרן האלקטרונים באופן דומה לעקרון מיקוד האור הרגיל בעדשה אופטית.

ממכניקת הקוונטים ידוע כי את האלקטרון אפשר לראות גם כגל כאשר אורך הגל נתון ע"י

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2emV}}$$

m- משקל החלקיק

V- מתח תאוצה

e- מטען החלקיק

λ- אורך הגל.

כאשר קרן האלקטרונים פוגעת בדגם ישנם אפקטים שונים: (ראה איור מס' 1)

א. פליטת אלקטרונים החוזרים מפני שטח הדגם עם אנרגיה הקרובה לאנרגיית הקרן

הפוגעת (back-scattered electrons-BE)

ב. פליטת אלקטרונים משניים היוצאים מפני שטח הדגם החיצוני ובעלי אנרגיה

נמוכה (secondary electrons-SE)

- ג. פליטת קרני X הנוצרות מעירור אטומים מהשכבה העליונה של פני הדגם.
- ד. אלקטרונים חודרים היוצאים מצידו השני של הדגם. למעשה, מצידו השני של הדגם יוצאת קרן אלקטרונים אחת בכוון של הקרן המקורית וגם יוצאות מספר קרניים נוספות המתקדמות בכווני דיפרקציה ע"פ חוק בראג (Bragg).
- ה. בליעת אלקטרונים בדגם.
- ו. קרינה אלקטרומגנטית בעלת אורך גל מסדר גודל של ספקטרום הזריחה הקתודית המתקבלת בחומרים פלואורסצנטיים וזרחניים.

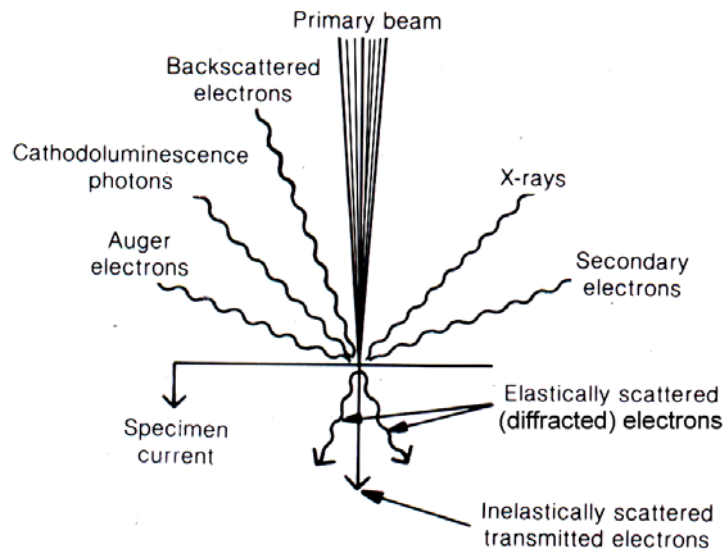


Figure 1. Signals resulting from interaction of primary beam with specimen.

### איור מס' 1

לכל קרינה המוצגת באיור 1 קיים גלאי מיוחד. במיקרוסקופים אלקטרוניים שונים משתמשים בסוגי קרינה מסוימים. בדרך כלל קיימים 4 סוגים של מכשירים:

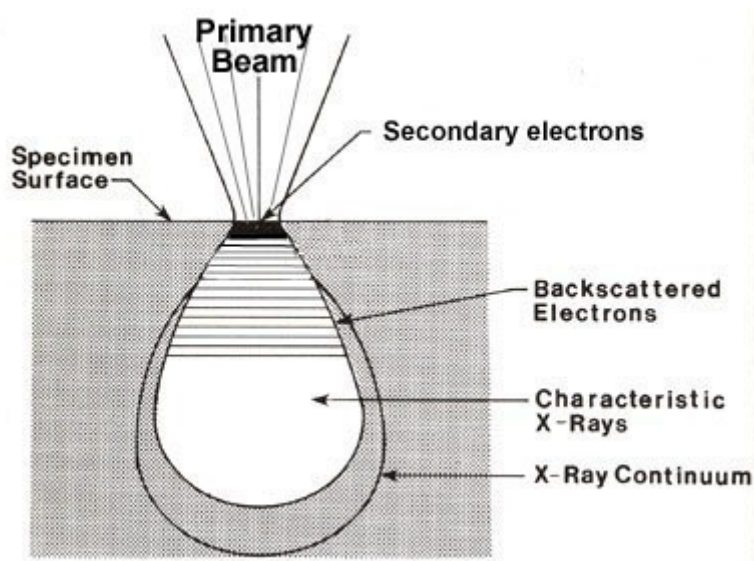
1. מיקרוסקופ אלקטרוני חודר (Transmission Electron Microscope (TEM)). במיקרוסקופ זה משתמשים באלקטרונים החודרים דרך הדגם. הגלאי במקרה זה הוא מסך פלואורסצנטי, או סרט צילום, או מצלמה דיגיטאלית. מיקרוסקופ אלקטרוני חודר נותן מידע על המבנה הפנימי של החומר.

### 2. מיקרוסקופ אלקטרוני סורק (Scanning Electron Microscope (SEM))

הקרינה שעליה מבוסס עקרון הפעולה של מיקרוסקופ זה היא קרינת האלקטרונים המשניים SE או האלקטרונים המוחזרים BE. האלקטרונים המשניים יוצאים מאזור אשר נמצא ממש מתחת פני השטח של הדגם, בעומק של כ- 50 Å, כפי שרואים בציור 2. לכן הקונטרסט בתמונה במיקרוסקופ סורק אשר מתקבלת באמצעות SE, בעיקרו, רגיש לטופוגרפיה פני שטח הדגם. לעומת זאת האלקטרונים המוחזרים (BE) יוצאים מאזור גדול יותר מאשר האלקטרונים המשניים (ראה איור

מס' 2), וכמות האלקטרונים המוחזרים תלויה בצפיפות החומר. לכן הקונטרסט בתמונה שמתקבלת באמצעות אלקטרונים מוחזרים יהיה רגיש למספר אטומי Z. הפאזה, שבתוכה יש יסוד בעל מספר אטומי גבוה יותר, תראה בהירה יותר ולהיפך. לכן, אם ניקח, לדוגמא, מתבדלים של בדיל ועופרת בתוך מטריצה מאלומיניום, מתבדלים אלו יראו בהירים מאוד ומטריצת האלומיניום תראה כהה. לעומת זאת דנדריטים של גרפיט בתוך מטריצת ניקל יראו כהים.

**איור מס' 2 מציג באופן סיכמתי את פיזור האלקטרונים בחומר. צורה גיאומטרית של איזור הפיזור דומה לצורת בצל. גודל הבצל תלוי במתח ההאצה של האלקטרונים ובצפיפות החומר. באיור זה גם מסומנים אזורים שמתוכם יוצאות קרינות שונות.**



איור מס' 2

3. גשש אלקטרוני למיקרו אנליזה – Electron Probe Microanalyser. מכשיר זה מיועד לאנליזות כימיות משטח בסדר גודל של מיקרונים. עיקרון הפעולה של המכשיר מבוסס על אנליזת ספקטרום של קרני X.

4. מיקרוסקופ אלקטרוני חודר-סורק (Scanning Transmission Electron Microscope -STEM) במכשיר זה משתמשים בדגם דק הזהה לדגמים במיקרוסקופ החודר, אלא שהקרן סורקת. יש אפשרות לקבל תמונה טופוגרפית מפני הדגם ע"י האלקטרונים המשניים, ויש גם אפשרות לבצע אנליזת קרינת X – היוצאת מפני הדגם על מנת לקבוע את ההרכב הכימי במקום מסוים בדגם.

### ב. מבנה של מיקרוסקופ אלקטרוני

בצורה כללית ביותר ניתן להציג את המבנה של כל מיקרוסקופ אלקטרוני באופן הבא:

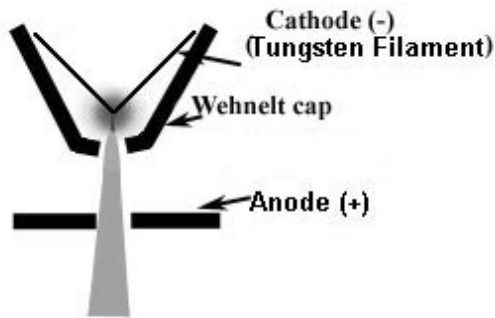
1. עמוד המיקרוסקופ עם עדשות (בתוך עמוד יש וואקום).

2. מערכת אלקטרונית עם ספקים, מגברים, גלאים.

עמוד המיקרוסקופ כולל:

1. תותח אלקטרוניים (מקור האלקטרוניים).

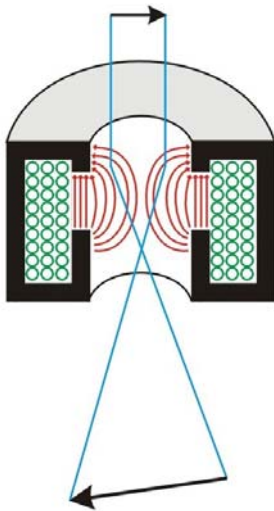
המרכיב העיקרי של תותח הוא חוט להט (filament) העשוי מחוט טונגסטן (ראה איור 3). כאשר מזרימים דרכו זרם, חוט הטונגסטן מתלהט ופולט אלקטרוניים. האלקטרוניים מואצים באמצעות אנודה אשר נמצאת במתח חיובי לעומת הקתודה (חוט להט). מתח ההאצה תלוי בסוג המיקרוסקופ: במיקרוסקופ SEM מתח ההאצה הוא בתחום 5-35 KV, במיקרוסקופ TEM תחום המתח בד"כ 100-400 KV.



איור מס' 3

2. עדשות אלקטרומגנטיות (ראה איור מס' 4) – תפקידן למקד

את קרן האלקטרוניים ע"י שינוי מסלול האלקטרון העובר דרך השדה המגנטי של העדשה. באמצעות העדשות ניתן לשנות את ההגדלה ע"י שינוי הזרם הזורם בעדשה. שינוי הזרם משנה את עוצמת השדה המגנטי בעדשה וכתוצאה מכך משנה את מרחק המוקד של העדשה, וההגדלה משתנה בהתאם. לכן שינוי ההגדלה יכול להיעשות ע"י סיבוב כפתור בספק זרם, ואין צורך בהחלפת עדשות כמו במיקרוסקופ אופטי.



איור מס' 4

העדשות הבסיסיות הקיימות במיקרוסקופ הן :

1. עדשת הקונדנסר (condenser) . תפקידה של עדשה זו לרכז את קרן האלקטרוניים היוצאים

מהתותח ויצירת הדמות של מקור האלקטרוניים בצורת מקור נקודתי. במיקרוסקופ אלקטרוני חודר קיימות בד"כ 2 עדשות כאלו ותפקידן לרכז את האור (אלקטרוניים) מן המקור על הדגם לצורך הארת הדגם.

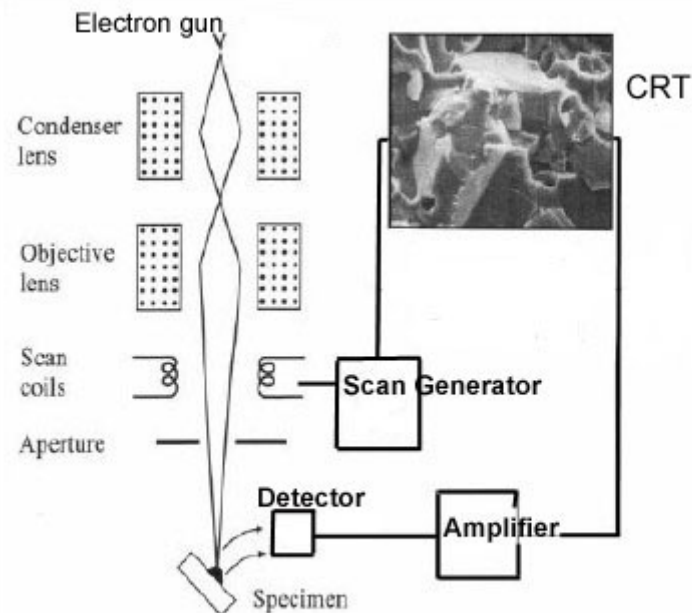
2. עדשת האובייקטיב (objective lens) . כושר הביצוע של מיקרוסקופ תלוי במיוחד בתכונות

עדשת האובייקטיב. היא בעיקר אחראית על **נושור ההפרדה** של המיקרוסקופ - כלומר המרחק המינימאלי בין הפרטים בדגם שניתן לראות באמצעות המיקרוסקופ. במיקרוסקופ TEM עדשת האובייקטיב נותנת את הדמות הראשונה. במיקרוסקופ SEM עדשת האובייקטיב מרכזת את קרן האלקטרוניים על הדגם, כך שמתקבלת קרן דקה ביותר עם קוטר  $10-50 \text{ \AA}$ . קרן זאת סורקת את פני שטח הדגם.

3. בנוסף לשתי העדשות הנ"ל קיימות במיקרוסקופ אלקטרוני חודר (TEM) עוד שתי עדשות: עדשת ה- intermediate (באמצעותה מתאפשרות הגדלות ביניים) ועדשת ה- projector (כאן מתבצעת ההגדלה הסופית)

### ג. מיקרוסקופ אלקטרוני סורק

מיקרוסקופ זה עובד לפי שיטת הסריקה (scanning). האלקטרונים הנפלטים מהתותח עוברים דרך עדשת-condenser ולאחר מכן דרך עדשת-objective אשר מרכזת את האלקטרונים לקרן דקה ביותר בעלת קוטר בערך  $10-50 \text{ \AA}$ . פגיעת הקרן בדגם גורמת לעירור אטומים באזור הבצל (ראה איור 2) ולפליטת אלקטרונים משניים או אלקטרונים חוזרים. פליטת האלקטרונים נמדדת באמצעות גלאים מיוחדים. עבור אלקטרונים משניים משתמשים בגלאי קרינה מסוג מונה נצנצים, עבור אלקטרונים חוזרים משתמשים בגלאי Si. תאור סכמתי של מערכת המיקרוסקופ הסורק ניתן באיור 5.



Schematic diagram of a SEM.

#### איור מס' 5

בעזרת מערכת סלילי הסריקה (scan coils) מסיטים את הקרן מנקודה לנקודה בדגם, ובכל נקודה מודדים את עוצמת הקרינה המתקבלת (עוצמת האות). עוצמת האות המתקבלת מכל נקודה בדגם קובעת בעצם מהי עוצמת הקרן אשר במקביל סורקת את מסך הטלוויזיה. מכיוון שישנו סנכרון (synchronization) מלא בין תנועת הקרן במיקרוסקופ לבין סריקה במסך הטלוויזיה, מקבלים על מסך TV את התמונה המתארת את פני השטח של הדגם. אם גודל המסך הוא D וגודל של איזור הסריקה בדגם הוא d, הגדלה של תמונה תהיה שווה ל-  $D/d$ .

על מנת להבין את תכונות ה- SEM חשוב לציין מספר דברים:

א. במיקרוסקופ אלקטרוני סורק קוטר הקרן הסורקת קטן מאוד ( $10\text{-}50 \text{ \AA}$ ) אולם גודל האזור שממנו נפלטים אלקטרונים משניים הוא גדול יותר, ואילו גודל האזור הפולט האלקטרונים החוזרים הוא עוד יותר גדול (ראה איור 2).

ב. אלקטרונים משניים יוצאים מפני השטח באנרגיה נמוכה מאוד (מ-  $10 \text{ eV}$  ועד  $100 \text{ eV}$ ) בהשוואה לאנרגיית הקרן הפוגעת. לכן מגיעים לגלאי אלקטרונים משניים רק מהאזור הקרוב ביותר לפני השטח של הדגם.

ג. האלקטרונים החוזרים מפני השטח הם בעלי אנרגיה הקרובה לאנרגיית הקרן הפוגעת. לכן האלקטרונים החוזרים יוצאים מאזור גדול יותר בדגם בהשוואה לאלקטרונים משניים. כתוצאה מכך כושר ההפרדה בתמונה המתקבלת באמצעות אלקטרונים חוזרים יהיה פחות טוב בהשוואה לתמונה שמתקבלת באמצעות אלקטרונים משניים.

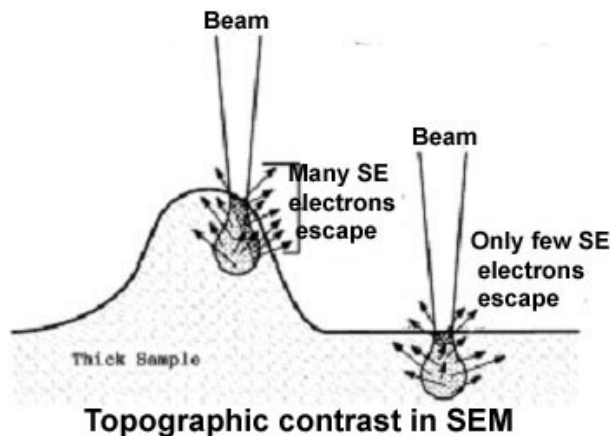
ביצוע של מיקרוסקופ אלקטרוני סורק ניתן לאפיין ע"י הפרמטרים הבאים:

א. **קונטרסט**. הקונטרסט, דהיינו קבלת הבדלי בהירות בין חלקים שונים של התמונה, הוא תוצאה של עוצמת קרינה (I) שונה מאזורים שונים של הדגם. הבדל העוצמה היחסי  $\Delta I/I$  נקרא קונטרסט.

כאשר תמונה במיקרוסקופ SEM מתקבלת מאלקטרונים משניים, הקונטרסט יהיה תלוי בגורמים הבאים:

1. במיקום הגלאי, אשר אוסף אלקטרונים משניים.

2. בטופוגרפיית השטח וזווית פגיעת קרן האלקטרונים במשטח הדגם. אזורים עם שיפוע הם בעלי



איור מס' 6

סיכוי גבוה יותר לבריחת אלקטרונים משניים ולכן עוצמת האות מאזורים אלו תהיה גדולה יתר (איור מס' 6). בגלל זה אזורים בולטים יותר נראים בהירים יותר מכיוון שלאלקטרונים קל יותר לצאת מהשטח.

3. בפונקציית העבודה של החומר שהיא האנרגיה הדרושה לשחרור אלקטרון מאטום. זה גם יהיה תלוי בכיווניות החומר.

לעומת זאת, כאשר תמונה ב- SEM מתקבלת מאלקטרוניס חוזרים, הקונטרסט יהיה תלוי, בעיקר, בצפיפות החומר (בהבדל בין המספר האטומי הממוצע  $Z$ ), אך גם טופוגרפית השטח משפיעה על קונטרסט זה.

ב. כושר הפרדה. כושר ההפרדה של המכשיר נקבע ע"פ גודל האזור שממנו נפלטים אלקטרוניס (SE)

או (BE) ולכן הוא תלוי בגורמים הבאים:

i. צפיפות החומר

ii. אנרגית הקרן

iii. קוטר הגשש הסורק

iv. סוג אלקטרוניס בהם משתמשים לקבלת תמונה.

באמצעות אלקטרוניס משניים ניתן להגיע לכושר הפרדה של  $10 \text{ \AA}$  – דבר שלא ניתן להשיג באמצעות BE-אלקטרוניס. כושר ההפרדה של מכשירי SEM רגילים הנמצאים בשימוש הוא  $30\text{-}50 \text{ \AA}$ .

ג. עומק שדה. עומק השדה נקבע ע"פ הזווית שבה הקרן מתכנסת לנקודה על פני שטח הדגם, לכן

עומק השדה תלוי בהגדלה ונע בין סדר גודל של מ"מ בהגדלות נמוכות (סדר גודל של  $100 \times$ ) לבין  $1 \mu\text{m}$  ~ בהגדלות גדולות (בסדר גודל של  $40,000 \times$ ). עומק השדה הגדול (בהשוואה למיקרוסקופ חודר) מאפשר בדיקת משטחים מאוד גסים (כגון שברים סיביים) אשר לא ניתנים לבדיקה בשיטות אחרות.

ד. הגדלה. את ההגדלה ב- SEM אפשר לשנות באופן רציף מ- 20 ועד בערך ל- 100,000.

בהשוואה למיקרוסקופ אלקטרוני חודר כדאי לציין שני חסרונות בולטים של המיקרוסקופ הסורק, והם:

1. כושר הפרדה גרוע יותר (במיקרוסקופ אלקטרוני חודר כושר ההפרדה הוא  $2 \text{ \AA}$  ~)

2. יצירת תמונה איכותית ב- SEM דורשת בדיקה בערך של  $10^6$  נקודות ונמשכת

כדקה או יותר.

אולם ל- S.E.M יש גם יתרונות והם:

א. עומק שדה ועומק מוקד גדולים ביותר המאפשרים חקירת שבר מחוספס ביותר.

ב. הכנת דגמים פשוטה יחסית.

דגמים לבדיקה ב- SEM בד"כ מוגבלים לקוטר  $25 \text{ mm}$  ועובי  $18 \text{ mm}$ , אך קיימים מכשירי SEM עבור דגמים גדולים יותר. הדגמים חייבים להיות מוליכים. דגמים שאינם מוליכים כגון פולימרים, קרמיקה וכו' מצופים בשכבה מתכתית דקה מאוד, כגון זהב.

## ד. הגשש האלקטרוני למיקרו-אנליזה (electron-probe microanalyser)

מבנה של גשש אלקטרוני באופן בסיסי דומה למבנה של מיקרוסקופ אלקטרוני סורק, אולם הדגש הוא על היכולת לבצע אנליזת יסודות בדגם ולא על היכולת לקבל תמונה איכותית. באמצעות הגשש האלקטרוני למיקרו-אנליזה ניתן לעשות אנליזה כימית כמותית ואיכותית של אזורים בדגם בסדר גודל של  $1 \mu\text{m}$ . ערך זה נקבע ע"פ גודל האזור מתחת לקרן שבו מתפזרים אלקטרונים המסוגלים לגרום לערור קרני-X (ראה איור מס' 2). כתוצאה מפליטת קרני-X מנפח גדול יחסית התלוי במתח ההאצה ובחומר, כושר ההפרדה של אנליזה כימית אינו יכול להיות יותר טוב מ- $1 \mu\text{m}$ . זיהוי יסודות מתבסס על אנליזת **ספקטרום קרני-X אופייני** אשר מתקבל כתוצאה מעירור אטומים בדגם. לכל יסוד ויסוד יש קרינת קרני-X אופיינית עם אורכי גל מסוימים, לכן בדיקת ספקטרום קרני-X יכולה לתת מידע על היסודות הנמצאים בחומר.

### אנליזה איכותית

באנליזה זו אנו מזהים את היסודות המרכיבים את החומר הנבדק וגם בודקים האם פילוג היסודות בחומר הוא אחיד או לא. במקרים בהם היסודות מפולגים בצורה לא הומוגנית, למשל, בדגם שבו נמצאים מתבדלים, ניתן לזהות יסודות אפילו אם הם נמצאים בכמות של פחות מ-500 ppm בסה"כ בדגם. באמצעות הגשש האלקטרוני למיקרו-אנליזה, קל לזהות פאזות בחומר, וזה בסופו של דבר עוזר להבין את התכונות שלו. הכנת הדגמים לאנליזה כימית היא יחסית פשוטה. אולם תנאי חשוב הוא ששטח פני הדגם חייב להיות מלוטש היטב. גודל הדגם יכול להיות בקוטר של 25 mm ובגובה  $20 \sim \text{mm}$ .

### אנליזה כמותית

בנוסף לאנליזה האיכותית, ניתן לבצע אנליזה כמותית עד דיוק של 1% יחסי. עקרון הפעולה הוא פשוט. משווים את עוצמת הקרינה האופיינית מהדגם המכיל יסוד מסוים לבין סטנדרט המכיל 100% מאותו יסוד. ע"י השוואה זו עבור יסודות שישנם בדגם ניתן לקבל באופן גס את הרכב הדגם. אולם לשם קבלת הרכב כימי מדויק, יש צורך להכניס תיקונים לתוצאות המתקבלות מחישוב יחסי העוצמות מהדגם ומהסטנדרט. תיקונים אלה מביאים בחשבון את הגורמים הבאים: מספר אטומי Z של היסוד הנבדק, בליעה, ופלווארסנציה (תיקון ZAF). החישובים מתבצעים בשיטת אטרציות כאשר הנתונים לצעד הראשון הם הנתונים המתקבלים רק מיחס העוצמות. בכל הצעדים הבאים יתבצע חישוב של השבר המשקלי של כל יסוד בדגם לפי נוסחה:

$$C_A = \frac{I_A}{I_A^o} \cdot (Z \cdot A \cdot F)$$



- $C_A$  – ריכוז משקלי של יסוד A בדגם
- $I_A$  – עוצמה המתקבלת מיסוד A בדגם,  $I_A^0$  - עוצמה המתקבלת מיסוד A בסטנדרט.
- $Z$  – גורם תיקון למספר אטומי (מחושב ע"פ ההרכב שהתקבל בצעד הקודם)
- $A$  – גורם תיקון לבליעה (מחושב ע"פ ההרכב שהתקבל בצעד הקודם)
- $F$  – גורם תיקון לפלואורסנציה (מחושב ע"פ ההרכב שהתקבל בצעד הקודם)

לצורך החישובים קיימת תוכנת מחשב מיוחדת (תכנית ZAF). לתוכנה זו דרושים הנתונים הבאים: מתח האצה, הסימול הכימי של היסודות הנבדקים, סוג הקרינה (K או L) שאנו ניקח עבור חישוב.

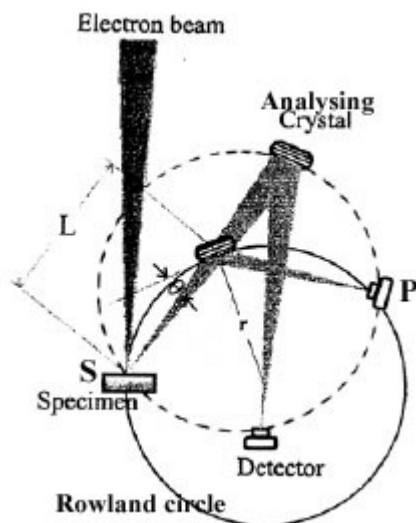
החלק העיקרי של גשש אלקטרוני הוא ספקטרומטר קרני X. לשם קבלת עוצמה גדולה של קרני X, אשר נוחה יותר לאנליזה, מערכת העדשות בגשש האלקטרוני מתוכננת כך שקוטר הקרן הוא גדול יותר בהשוואה לזה שבמיקרוסקופ אלקטרוני סרוק. עקב פיזור האלקטרונים בחומר, הספקטרומטר קולט קרני X מאזור הדגם מסדר גודל של מיקרון אחד, וזה קובע את כושר ההפרדה של המכשיר באנליזה כימית של החומר.

קיימים שני סוגים של ספקטרומטר קרני X:

א. ספקטרומטר WDS (wavelength-dispersive spectrometer)

ב. ספקטרומטר EDS (energy dispersive spectrometer).

ציור סכמתי של ספקטרומטר WDS ניתן באיור 7:

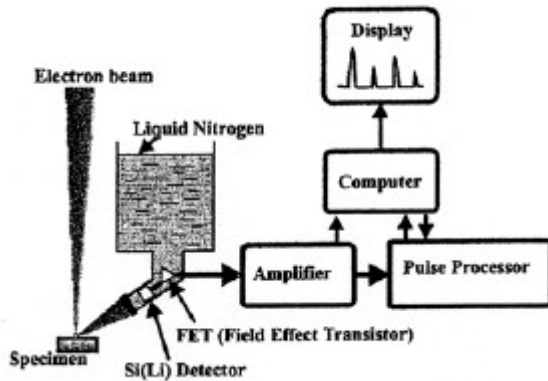


איור מס' 7

בספקטרומטר מסוג WDS נבדקת קרינת X אופיינית של יסוד מסוים ע"פ אורך גל  $\lambda$  של פוטונים. פוטון קרני X בעל אורך גל  $\lambda$ , אשר נפלט מדגם S, מוחזר מפני הגביש (analyzing crystal) בזווית  $\theta$  המתאימה לתנאי בראג:  $2d\sin\theta = n\lambda$ . גיאומטריה מיוחדת של ספקטרומטר (ראה איור 7) מאפשרת קליטת קוונט זה על ידי גלאי P אשר נמצא

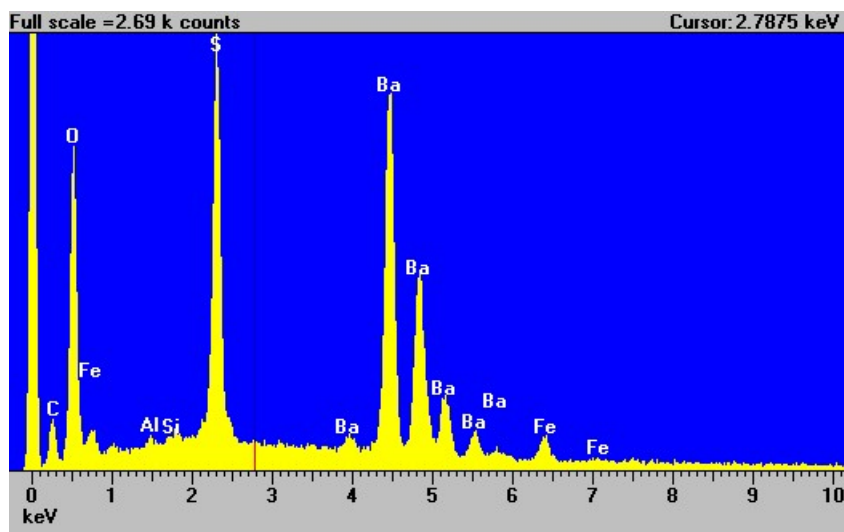
על אותו מעגל בו נמצאים הדגם והגביש (Rowland circle). כדי לקלוט אורך גל אחר (כלומר לבדוק יסוד אחר) יש לשנות את המיקום של הגביש ושל הגלאי כך, שתנאי בראג יתקיימו עבור אורך הגל החדש. (ראה את המעגל המקווקו).

ציור סכמתי של ספקטרומטר EDS ניתן באיור 8 :



איור מס' 8

החלק העיקרי של מערכת EDS הוא דטקטור (גלאי) Si (Li) המחובר למגבר אלקטרוני. דטקטור זה נמצא בטמפ' של חנקן נוזלי, על מנת להקטין את הרעש האלקטרוני. כל קוונט X-ray, בעל אנרגיה  $E = h\nu$ , גורם להיווצרות פולס חשמלי (pulse), כאשר גובה הפולס פרופורציונאלי לאנרגיית הקוונט. מתקן אלקטרוני מיוחד הנקרא pulse processor סופר במשך כדקה את מספר הפולסים בהתאם לגובה שלהם, ומציג את תוצאת הספירה בגרף: מספר הפולסים כנגד אנרגיית הקוונט. גרף זה, למעשה, מייצג ספקטרום קרני-X שמתקבל מהדגם. דוגמה של ספקטרום EDS מוצגת באיור מס' 9.



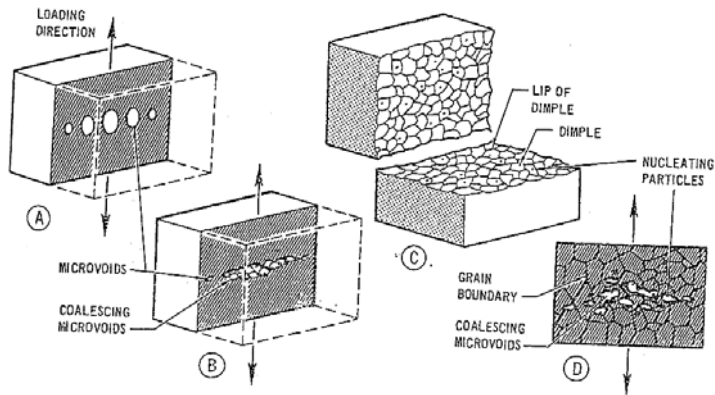
איור מס' 9

היתרון החשוב של מערכת EDS (בהשוואה למערכת WDS) הוא שמתקבל ספקטרום מלא של קרני X – בפרק הזמן קצר מאוד, במשך כדקה. ספקטרום זה מאפשר ביצוע אנליזה מהירה בו-זמנית של כל

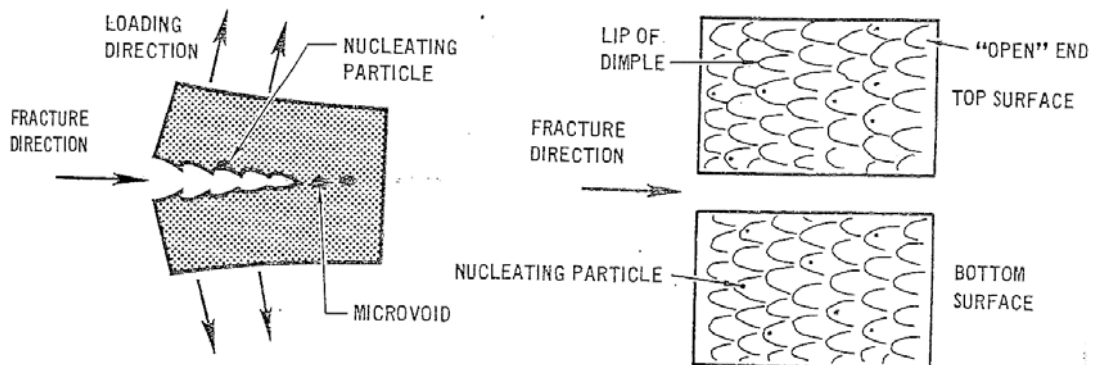
היסודות שנמצאים בדגם. לעומת זאת בספקטרומטר WDS ניתן לבצע אנליזה רק של יסוד אחד, ולאנליזת יסוד אחר יש לכוון את הספקטרומטר מחדש. החיסרון של מערכת EDS הוא שכושר ההפרדה של אנרגית הקוונטים הוא נמוך (130 – 140 ev) בהשוואה למערכת WDS ( 5 – 10ev).

# אפיון שבר במיקרוסקופ אלקטרוני SEM

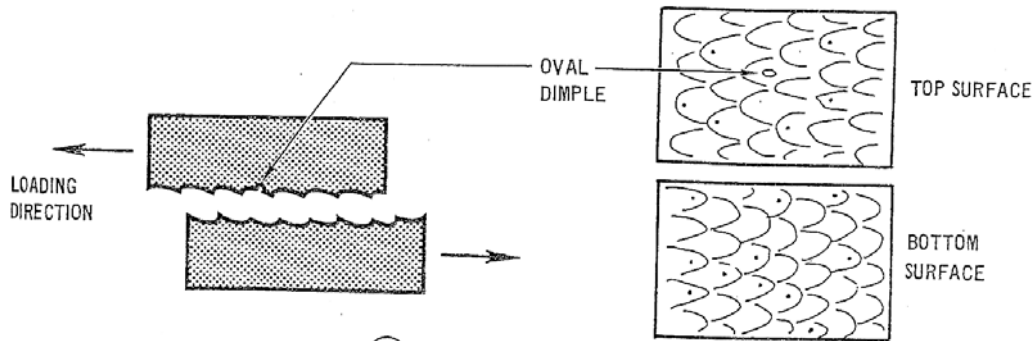
נספח 1 תאור סכמטי של התפתחות שבר משיך.



Dimple formation by microvoid coalescence.



(A) TEAR FRACTURE

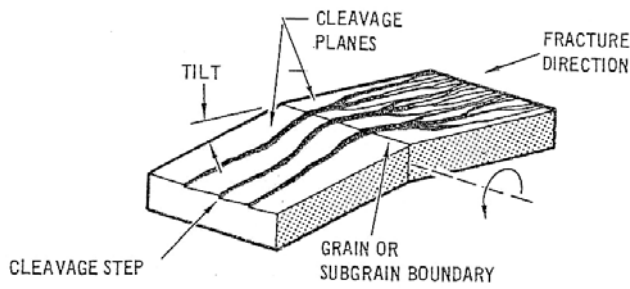


(B) SHEAR FRACTURE

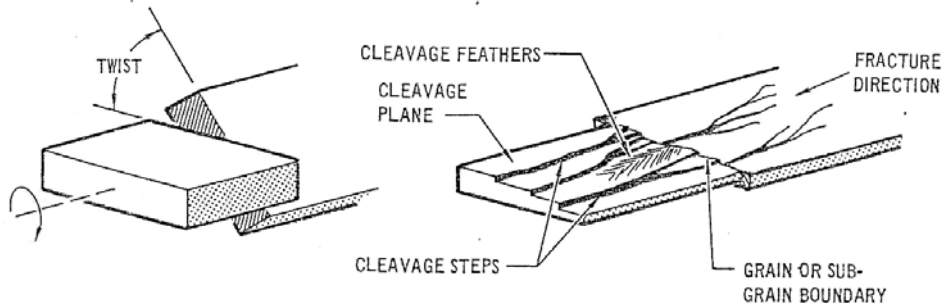
The formation of elongated dimples under tear and shear loading conditions.

שבר משיך ניתן לאפיין על ידי הווצרות גומות (dimples) אשר ניתן לזהות ב־ SEM.

**Intergranular or transgranular fracture** **נספח 2**  
 (שבר פריד מאופיין על די שבר בין גרעינים או על די שבר בתוך גרעין)

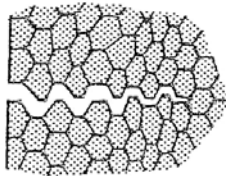


(A) TILT BOUNDARY

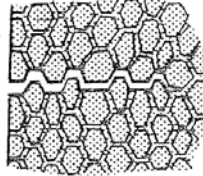


(B) TWIST BOUNDARY

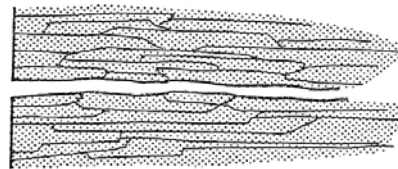
Cleavage fractures showing the effect of subgrain and grain boundaries. תאור סכמטי של ביקוע (cleavage) של גרעין.



(A) DECOHESION ALONG GRAIN BOUNDARIES OF EQUIAXED GRAINS

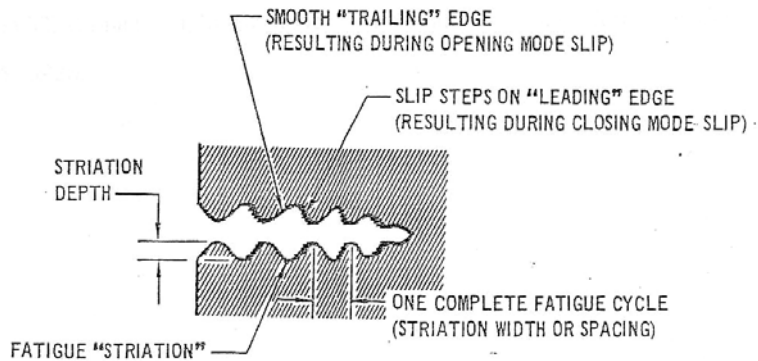


(B) DECOHESION THROUGH A WEAK GRAIN BOUNDARY PHASE

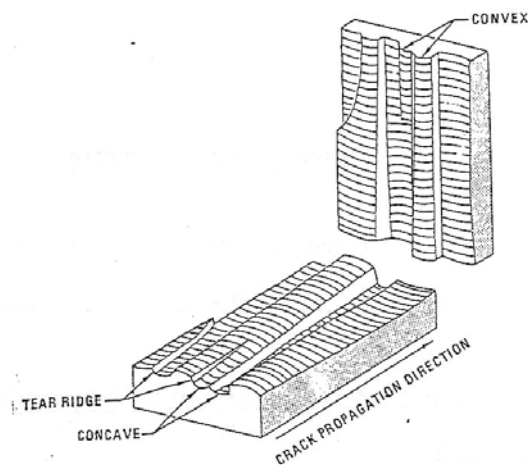


(C) DECOHESION ALONG GRAIN BOUNDARIES OF ELONGATED GRAINS

תאור סכמטי של שבר בין-גרעיני. Decohive rupture along grain boundaries



Schematic presentation of fatigue striations that form during stage II of fatigue.



### ביבליוגרפיה

1. B.L. Gabriel, "SEM: A User's Manual for Materials Science", American Society for Metals, Ohio, USA, 1985, 198p.
2. G.I. Goldstein, H. Yakubovitz, D.E. Newbury, E. Lifshin, G.W. Colby, G.R. Coleman, "Practical Scanning Electron Microscopy. Electron and Ion Microprobe Analysis", Plenum Press, N.Y. and London, 1975, 582p.
3. "SEM/TEM Fractography Handbook", Metals and Ceramics Information Center, Ohio, USA,