

## 5. דוזימטריה במוני מצב מוצק

### חלק א: דוזימטר יהלום

גלאי יהלום מתאימים למדידת דוזה מקרני פוטונים ואלקטרוניים בתחומי MeV, והם בעלי רזולוציה גבוהה.

היהלום בעל מספר אטומי (6) הדומה למספר האטומי האפקטיבי של רקמה רכה (7.42).

ממדי הדוזימטר והרזולוציה המרחבית דומים לזה של גלאי דיודת סיליקון.

יתרונות: רגישות גבוהה, זרם זליגה נמוך, ועמידות בפני נזקי קרינה.

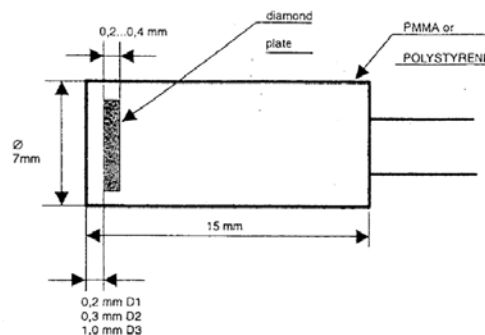
תגובת היהלום כמעט ולא תלויה באנרגיית הפוטונים הפוגעים בו. יחס מקדמי ההנחתה של מים ושל יהלום קרוב לקבוע.

ביהלום ישנם אטומי חנקן המהווים אי ניקיונות טבעיים, החנקן מיונן פעם אחת משום שלרשותו אלקטרון חיצוני, שיכול לעלות לרמת ההולכה. אטום חנקן כזה מהווה מלכודת עבור אלקטרוניים שהשתחררו עקב יצירת חור-אלקטרון.

Vatnitsky & Jarvinen בנו מערכת מדידת דוזה יחסית המבוססת על יהלום:

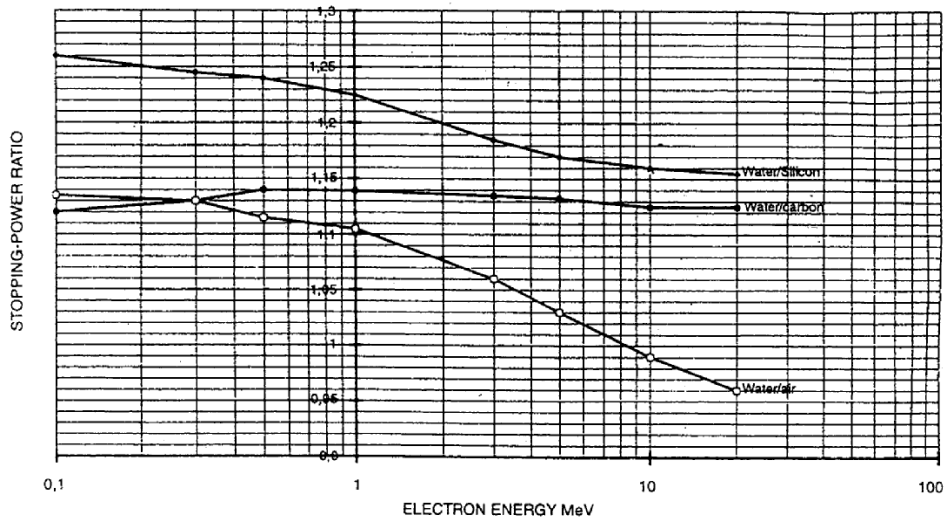
יהלום טבעי שטוח בעובי 0.2-0.4 מ"מ, הוצב בתוך מיכל פלסטיק בעומקים בין 0.2 מ"מ, 0.3 מ"מ ו-1.0 מ"מ.

הוצב מתח bias של 100V, 150V, 250V. אחרי הפעלת המתח הגבוה, המערכת הוכנה לקריאת דוזה עד . אחרי הפעלת המתח הגבוה, המערכת הוכנה לקריאת דוזה עד 3 Gy.



Construction of the diamond detectors.

תרשים 1: מבנה של גלאי יהלום.



Ratios of mass collision stopping powers for water and the three detector materials ICRU 37

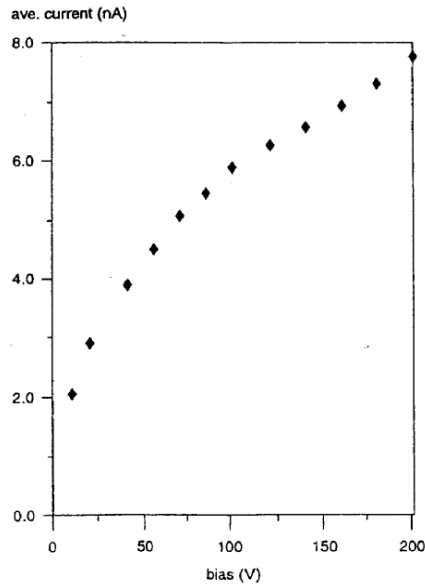
תרשים 2: מנת כושרי העצירה להתנגשות של מים ושלושת חומרי הגלאי.

גלאי יהלום הם נגדים רגישים לקרינה שקבוע ההולכה בהם משתנה באופן פרופורציונלי לקצב הדוזה, כמעט ללא תלות במתח ה-bias. מתח הביאס המומלץ הוא בתחום של +100 V – +200 V בו הגלאי עובד עם איסוף מטען לא מושלם, על פי זמן הריקומבינציה הקצר מהזמן המכסימלי שלוקח לאלקטרון להיאסף ע"י האנודה.

$$i \propto D^\Delta \quad \Delta \approx 0.98$$

הקשר בין הזרם על הגלאי לקצב הדוזה הוא

יהלום מתאים לדוזימטריה חייב להכיל כמות מסויימת של אי ניקיונות, עודף של אי ניקיונות עלול להחליש את הרגישות ולגרום לתופעות קיטוב. יהלומים מסוג Iia הם המתאימים לדוזימטריה, שכן הם כמעט שקופים לאור UV, ובעלי כמות קטנה של אטומי חנקן. הזרם הממוצע הנמדד באלקטרומטר כתלות במתח ביאס עבור קצב דוזה של 2.0 Gy/min מוצג בגרף הבא:



Average diamond detector current in nA vs. bias voltage for a dose rate of  $2.0 \text{ Gy min}^{-1}$ . Current is the stable electrometer reading in nC for a dose of 1.0 Gy divided by the irradiation time of 30 s.

יעילות איסוף המטען מתקבלת ממנת זרם הגלאי מחולקת בקצב יצירת המטען ביוניזציה. קצב יצירת המטען ניתן לחישוב מידיעת הדוזה, צפיפות ונפח של המרכיב הרגיש בגלאי, ומידיעת כמות האנרגיה הנדרשת ליצירת זוג יונים:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{DV\rho e}{w}$$

דוגמה:

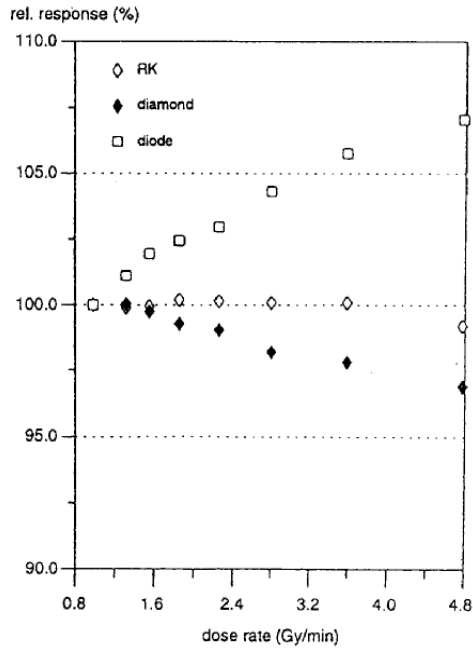
צפיפות היהלום היא  $3.5 \text{ g/cm}^3$ , נפח:  $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$

$w=16 \text{ eV}$

$D'=2.0 \text{ Gy/min}$

אזי  $Q'=10^{-8} \text{ C/s}$

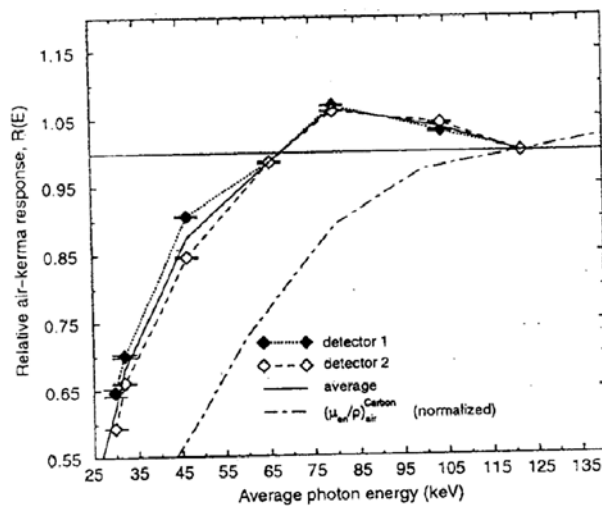
בגרף הבא מוצגת השוואה בין תגובת תא יינון (RK), יהלום ודיודה. עד לקצב של  $1.5 \text{ Gy/min}$  תגובת היהלום ותא היינון דומים.



Response of diamond, diode, and RK ionization chamber as average dose rate varies from 0.98 to 4.77 Gy min<sup>-1</sup> by changing FSD from 140 cm to 60 cm. Dose per pulse varies from 0.079 to 0.387 mGy. Values on the graph are the ratio of each detector reading to Farmer ionization chamber reading, normalized to 100% at 0.98 Gy min<sup>-1</sup>.

ממחקרים נמצא כי יהלום הוא דוזימטר אמין עבור קרני X מעל 100 kV.  
 עבור קרני X נמוכי אנרגיה, נדרש גורם תיקון בסדר גודל של עד 12%.

בגרף הבא רואים את עקומות התגובה (מנורמלות ל -1 באנרגיה 122 keV). באזור ה- 80 keV התגובה עולה עד 6% מעל ליחידה. מתחת לאנרגיה זו ישנה ירידה עד ל 65% באנרגיה 30 keV כתוצאה מהנחתה של פוטונים בגביש.



דוזימטר דיודת סיליקון בעל היתרונות הבאים על יהלום :

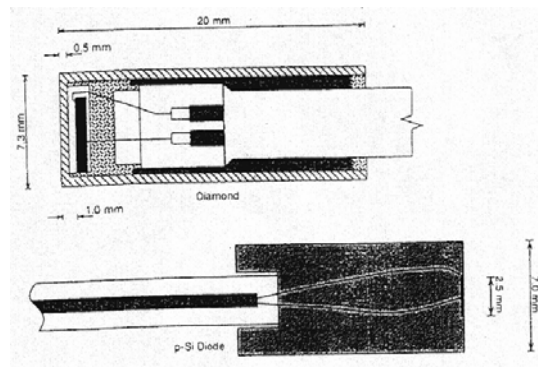
קטן יותר

צפיפות גבוהה

רזולוציה מרחבית גדולה

חסרון גדול : מספר אטומי גבוה יחסית למים.

צורתו של גלאי יהלום טיפוסי ומימדיו מתוארים בתרשים הבא :



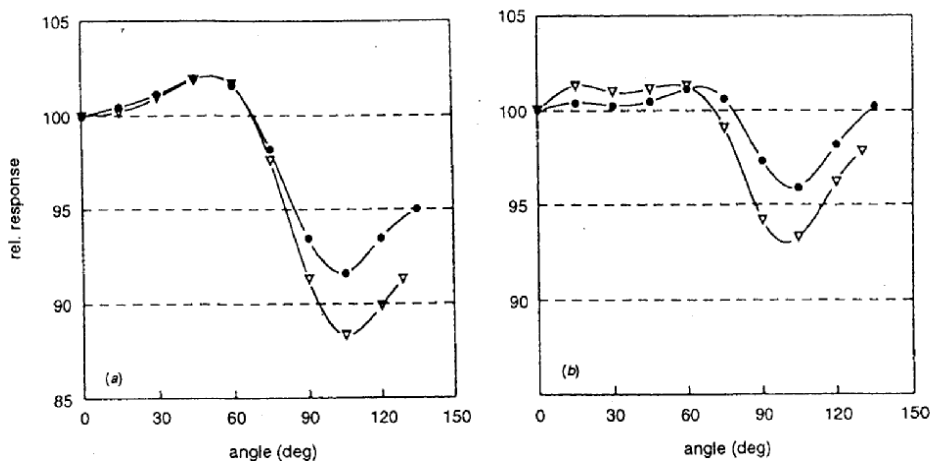
טבלת המאפיינים של גלאי יהלום (מיוצר ע"י PTW) :

חנקן ובורון ( $<10^{19}$ atoms/cm <sup>3</sup> )	אי-ניקיונות
1.4 mm <sup>3</sup>	נפח התחום הרגיש
0.33 mm	עובי התחום הרגיש
4.3 mm <sup>2</sup>	שטח הגלאי
+ 100 V (+/- 1%)	מתח bias
$< 10^{-12}$ A	זרם חושך
$1.75 \cdot 10^{-7}$ C/Gy	רגישות לקרינת CO-60
$\leq 5$ Gy	ערך דוזה טרום הקרינתית

תגובה זוויתית :

בגרף הבא מופיעות תגובות של יהלום ודיודה לקרינה באנרגיה של 6 MeV. הקריאות נורמלו בזווית 0 מעלות. ניתן לראות שהמינימום בתגובת הדיודה נמוך מהמינימום בתגובת היהלום, בעוד שתגובת המכסימום שווה.

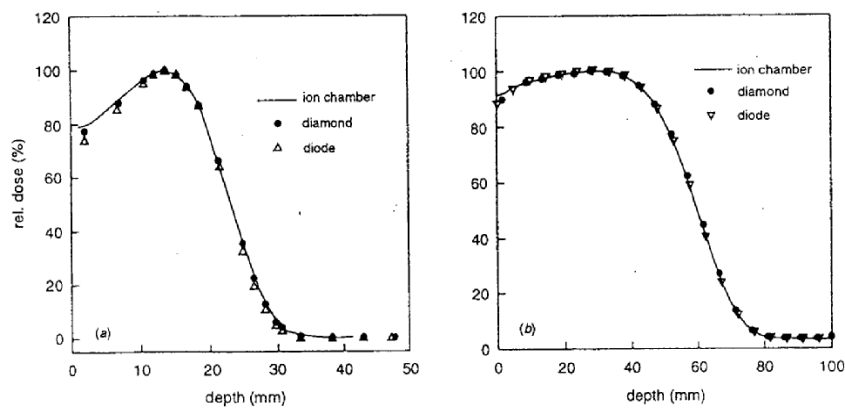
במקרה של 15 MeV רואים את אותה תופעה, אלא שכאן התגובה משתנה חלש.



Directional response of the diamond and diode detectors for (a) 6 MeV and (b) 15 MeV. •, diamond; ▽, diode.

השינויים הזוויתיים בתגובה נובעים משינוי בשווי משקל האלקטרונים המשניים לפי זווית המקור אל פני הגלאי.

השוו את תגובת היהלום (בזווית מקבילה לקרן), לתגובת דיודה ולתגובת תא יוניזציה כתלות בעומק בשתי אנרגיות: 6 MeV 15 MeV.



Depth-dose curves as measured with the diamond and diode detectors in the parallel orientation, compared with corrected ionization chamber results for (a) 6-MeV and (b) 15-MeV beams.

מפרט טכני של גלאי יהלום:

- אנרגיית פוטונים : 80 keV – 20 MeV
- אנרגיית אלקטרונים : 4-20 MeV
- טווח קצב דוזה : 0.05-30 Gy/min

- ליניאריות התגובה:  $\pm 2\%$
- זמן איסוף מטען מינימלי:  $10^{-8}$  sec
- עמידות בפני קרינה עד: 100 kGy
- קוטר חיצוני: 7.3 mm

היהלום הוא יהלום שעבר גידול טבעי, ולכן ממדיו המדויקים של הנפח הרגיש אינם ידועים במדויק. לכל דוֹזימטר יהלום מצויין הנפח בנתוני הכיול מהיצרן.

נמצא כי תגובת היהלום יורד מעט עם עליית קצב הדוזה. הסיבה לכך נעוצה בתיאוריה של הולכה במבודד עקב כניסת קרינה, האומרת שירידת התגובה נובעת מזמן רקומבינציה קצר מאד של חור-אלקטרון. הביטוי האמפירי לזרם בגלאי הוא:

$$i = i_{dark} + RD^{\Delta}$$

R – פרמטר התאמה של התגובה.

שימושים:

Rustgi השתמש בדוֹזימטר יהלום עבור מקורות בראכיתרפיה. מקור Ir-192 בעל אקטיביות גבוהה נבחר לשימוש. אי איזוטרופיות הקרינה "בתוך אוויר" כתוצאה מזווית מקור הזרע נמדדה במרחק של 5 cm ושל 10 cm.

Mobit ו-Sandison השתמשו בקוד מונטה קרלו EGS4 לחקור את תגובת גלאי היהלום באמצעות הקרנה בקרני אלקטרונים רפואיים וחד אנרגטיים. תחומי האנרגיה הם בין 5-20 MeV. הסימולציה הוכנה עבור יהלום בעל נפח רגיש בגודל 0.4 mm עובי ובקוטר של 4.4 mm. תלות התגובה בעומק היתה קבועה (+-1%). היהלום הוצב באמצעות דבק אפוקסי בעל Z נמוך. בתרשים הבא מתואר חתך של הגלאי.

