

הרצאה 10- חיישני אור

הקדמה

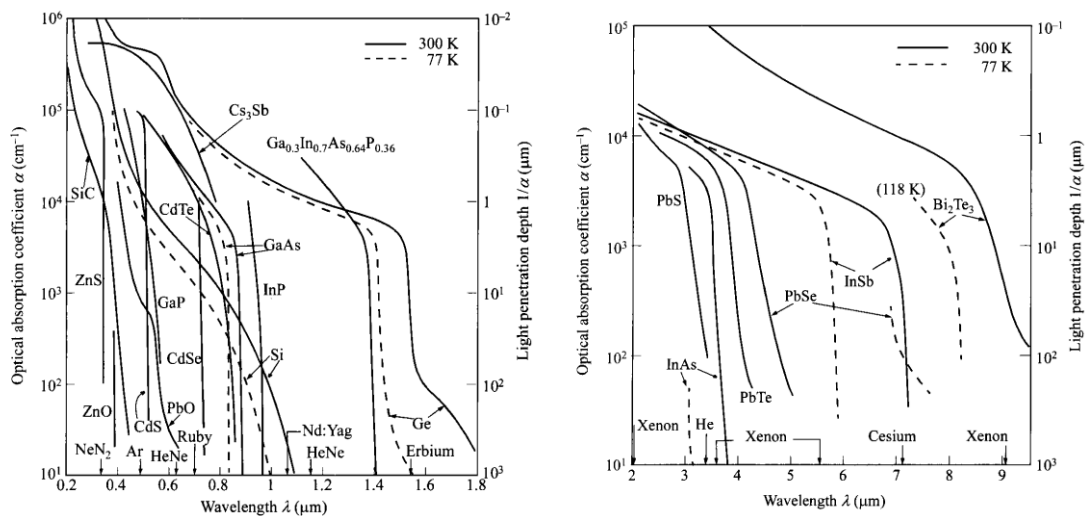
חיישני אור הם התקנים אשר תפקידם להמיר אותות אופטיים לאותות חשמליים. לדוגמה, בתקשורת אופטית, אשר נעשית ברובה בעזרת אור באורכי גל הנע בין 0.8 ל-1.6 מיקרון, התקני מוליכים למחצה ממירים מודולציה באות האופטי למודולציה באות חשמלי. מאחר ולסיבים אופטיים יש הפסדים, יש אורך סופי בו הסיבים מסוגלים לשמור על יחס אות לרעש סביר. על כן, על מנת להעביר אותות אופטיים למרחקים גדולים, נדרש להגביר את האות האופטי כל מרחק מסוים. הגברה זו, יכולה להיעשות על ידי המרת האות האופטי לאות חשמלי, הגברה של האות החשמלי והמרה מחדש של האות החשמלי המוגבר לאות אופטי אשר מוזרק מחדש לסיבים. שימוש זה מגדיר דרישות נוקשות מאוד על חיישני האור בהם עושים שימוש בתהליך. עליהם להיות רגישים מספיק בשביל למדוד עוצמות אור נמוכות, מהירים מספיק על מנת שלא יגבילו את קצב העברת הנתונים, ועליהם להוסיף כמה שפחות רעש לאות המוגבר. התקנים אחרים משמשים כחיישני אור במצלמות דיגיטליות. להתקנים אלו יש דרישות אחרות, כמו גודל וצריכת הספק. בהרצאות הקרובות נסקור התקנים שונים להמרת אור לחשמל ונדבר על היתרונות והחסרונות שיש לכל סוג של התקן.

ניתן לסווג את חיישני האור לשני סוגים. סוג ראשון חש את האור על ידי עליה בטמפרטורה כאשר אנרגיה נבלעת במשטח קהה על ההתקן. התקנים אלו מתאימים יותר לחישה של אורכי גל ארוכים מאוד והם דומים בעקרון הפעולה שלהם לחיישני טמפרטורה. אנו ננתח חיישנים המבוססים על האפקט הפוטואלקטרי. הפעולה של כל חיישני חיישנים אלו מבוססת על תהליך בן שלושה שלבים, פוטו-גנרציה של נשאי מטען, תנועת נשאי המטען (ולאו הכפלה שלהם) ואיסוף נשאי המטען כזרם חשמלי אשר מגדיר את אות המוצא.

מאחר והאפקט הפוטואלקטרי מבוסס העברת אנרגיה מפוטון לנשאי המטען, ניתן לקשר בין אורך הגל של הפוטונים לגודל מעבר האנרגיה הדרוש:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{1.24}{\Delta E} \quad (1)$$

כאשר ΔE הוא ביחידות של אלקטרון וולט, c היא מהירות האור, ו h הוא קבוע פלנק. ברוב המקרים ΔE הוא למעשה פער האנרגיה של המל"מ. בהתקנים המבוססים על עקרון זה, משוואה זו מגדירה את אורך הגל המקסימלי אליו החישן רגיש. במקרים אחרים, מעבר האנרגיה הזה יהיה גובה של מחסום פוטנציאל בממשק מתכת מל"מ, או הפער האנרגטי בין רמת אנרגיה בתוך פער האסור ותחתית פס ההולכה. התקנים המבוססים על מעברים אלו ישמשו לחישה של אורכי גל אחרים. הבחירה של מנגנון יצירת המטען, והחומרים מהם עשוי החישן תקבע על ידי הדרישות הספציפיות של האפליקציה.



איור 1: מקדמי הבליעה של מוליכים למחצה שונים עבור תחום אורכי גל בתחום ה-IR (צד ימין) ובאור הנראה (צד שמאל). החצים מסמנים את אורכי הגל של לייזרים מסוגים שונים.

כאשר שכבת מוליך למחצה עבה יותר מאורך הגל בחומר, הבליעה בה מוגדרת על ידי מקדם הבליעה, α וחוק Beer-Lambert. על כן, מקדם הבליעה (שמשתנה כתלות בחומר ואורך הגל) מגדיר איזה חלק מאלומת האור הפוגעת בהתקן נבלע בו, ומהי התפלגות בליעת האור בתוך ההתקן. לדוגמה, ככל שמקדם הבליעה גדול יותר, הוא נבלע קרוב יותר לפני השטח ומקדם בליעה נמוך גורר שאור יבלע עמוק יותר בתוך ההתקן. במקרה בו מקדם הבליעה נמוך מאוד, ההתקן יהיה שקוף לאור הפוגע והבליעה בו תהיה קרובה ל 0. איור 1 מציג את מקדמי הבליעה של מולכים למחצה שונים בטמפרטורות של 77K ו-300K. ניתן לראות כי ברוב המקרים מקדמי הבליעה עולים עם הטמפרטורה.

למהירות של חיישנים גם יש חשיבות רבה עבור אפליקציות שונות, במיוחד במערכות תקשורת אופטית שכן עליהם להיות מהירים מספיק על מנת שלא יגבילו את קצב העברת הנתונים. לצורך כך, נדרש כי זמני החיים של נשאי המטען בהתקנים יהיו נמוכים יותר אך המחיר בכך הוא שזרמי הזליגה (מכונים גם זרמי החושך) יהיו גבוהים יותר. בנוסף, על רוחב אזור המיחסור להיות קטן יותר על מנת שנשאי המטען יעברו דרכו מהר יותר. עם זאת, קיבול שכבת המיחסור מגדיר את העובי המינימלי הדרוש כך שנדרשת אופטימיזציה לרוחב שכבת המחסור בהתאם לאפליקציה עבורה החיישן מיועד.

על מנת שלהתקן תהיה רגישות מקסימלית, נדרש כי זרם האור (פוטו-זרם) יהיה כמה שיותר גדול. לשם כך נגדיר את היעילות הקוואנטית להיות היחס בין שתף נשאי המטען, J_{ph}/q , לשטף הפוטונים הפוגע בהתקן, Φ :

$$\eta = \frac{J_{ph}}{q\Phi} = \frac{J_{ph}}{q} \left(\frac{h\nu}{P_{opt}} \right) \quad (2)$$

P_{opt} הוא ההספק של האות האופטי ליחידת שטח. במקרה האידיאלי, היעילות הקוואנטית היא 1. עם זאת, בדרך כלל היעילות קטנה מ-1 בגלל הספדים כמו רקומבינציה, החזרה של אור מפני השטח של ההתקן, העברה של אור דרך ההתקן וכו'. ניתן להגדיר גם את הרספונסיביות, $\mathcal{R}$, של ההתקן להיות היחס בין הזרם החשמלי להספקי האופטי:

$$\mathcal{R} = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda (\mu m)}{1.24} \left[\frac{A}{W} \right] \quad (3)$$

על מנת לשפר את האות עוד יותר, יש לחלק מההתקנים מנגנוני הגבר פנימיים. טבלה 1 מציגה את ההגבר ומהירות התגובה של התקנים שונים. מהטבלה ניתן לראות כי ישנם התקנים אשר מסוגלים להגביר את האות עד פי מיליון. עם זאת, הגברה של האות במקרים רבים מגבירה גם את הרעש ועל כן הגבר גבוה הוא לא תמיד הפתרון המוצלח ביותר.

טבלה 1: הגבר ומהירות התגובה של חיישני אור שונים

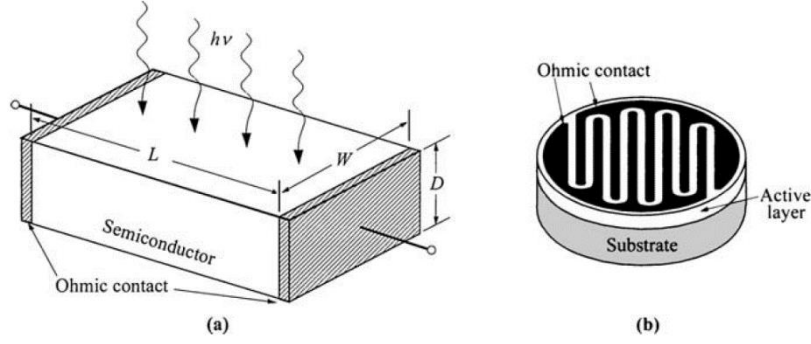
התקן	הגבר	מהירות תגובה (s)
פוטו-מוליך	10^6	10^{-8} - 10^{-3}
פוטו-דיודה	1	10^{-11}
	1	10^{-10} - 10^{-8}
	1	10^{-11}
CCD	1	10^{-11} - 10^{-4}
דיודת מפולת	10^2 - 10^4	10^{-10}
פוטו-טרנזיסטור	≈ 100	10^{-6}

פוטו-מוליכים

פוטו-מוליכים הם פשוט פיסות מל"מ עם מגעים אוהמים בשני הקצוות שלהם כמתואר באיור 2. כאשר אור נבלע בהם, נשאי מטען מעוררים וכתוצאה מכך מוליכות ההתקן עולה. נשאי המטען יכולים לעבור מפס הערכיות להולכה (מעברים אינטרנזיים) או דרך מצבים בתוך הפס האסור (מעברים אקסטרנזיים). מנגנוני עירור המטען מתוארים באיור 3. במל"מ אינטרנזי המוליכות נתונה על ידי:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (4)$$

ועל כן, השינוי במוליכות נובע משינוי במספר נשאי המטען. סף אורך הגל עבור התקנים אלו כמתואר במשוואה (1) הוא רוחב הפס האסור. עבור אורכי גל קצרים יותר, חלק מהקרינה הפוגעת בתא נבלעת



איור 2: דיאגרמה סכימאטית של פוטו-מוליך (א), ומבנה של פוטו-מוליך עם מגעים השזורים אחד בשני ומרווח קטן ביניהם (ב).

במוליך למחצה ומביאה לגנרציה של זוגות אלקטרון-חור. עבור מל"מ מסומם (אקסטרניזי), יש גם עירור בין קצוות פסי האנרגיה ורמת האנרגיה של המזהמים בתוך הפס האסור.

הביצועים של חיישני אור ככלל ופוטו-מוליכים בפרט נמדדים בעזרת שלושה פרמטרים, יעילות קוונטית והגבר, זמן התגובה, והרגישות (דיטקטיביות). ננתח את הפעולה של פוטו-מוליך תחת הארה כמתואר באיור 2. בהנחה שההתקן נמצא במצב מתמיד (מתח וקרינה קבועים בזמן) וכי הקרינה אחידה במרחב, מספר הפוטונים הפוגעים בהתקן בכל שנייה הוא $P_{opt}/h\nu$. במצב מתמיד, ובהנחה שההתקן סימטרי לחלוטין, זרם האלקטרונים וזרם החורים קבועים לאורך כל ההתקן ועל כן, סך כל הגנרציה שווה לסך כל הרקומבינציה (משוואות הרציפות מראות כי פער בין גנרציה ורקומבינציה גורר שינוי בזרם). נניח כי עובי ההתקן, D , גדול בהרבה מעומק הבליעה $1/\alpha$ כך שכל הקרינה החודרת לחומר נבלעת בו. במצב זה, סך כל הגנרציה והרקומבינציה ליחידת נפח מקיימות:

$$G_e = \frac{n}{\tau_n} = \frac{p}{\tau_p} = \frac{\eta(P_{opt}/h\nu)}{WLD} \quad (5)$$

כאן, היעילות הקוואנטית, η , היא מספר נשאי המטען שכל פוטון מייצר ו- τ הוא זמן החיים של נשאי המטען. נשים לב כי בפיתוח זה הזנחנו את התלות המרחבית של בליעת הקרינה. בהתקנים אלו, נשתמש בדרך כלל במל"מ אינטרינזי או במל"מ עם סימום רקע נמוך מאוד. על כן, ריכוז הנשאים גבוה מריכוז המזהמים וריכוז נשאי המטען במצב מתמיד מקיים:

$$n = p = G_e \tau_n \quad (6)$$

עבור מל"מ טהור, הפוטו-זרם בין האלקטרודות יקבע על פי המוליכות המוביליות, ומימדי ההתקן:

$$I_p = \sigma \mathcal{E} W D = q(\mu_n + \mu_p) n \mathcal{E} W D \quad (7)$$

נציב את הביטוי לריכוז הנשאים מתוך משוואה (5) ונקבל כי:

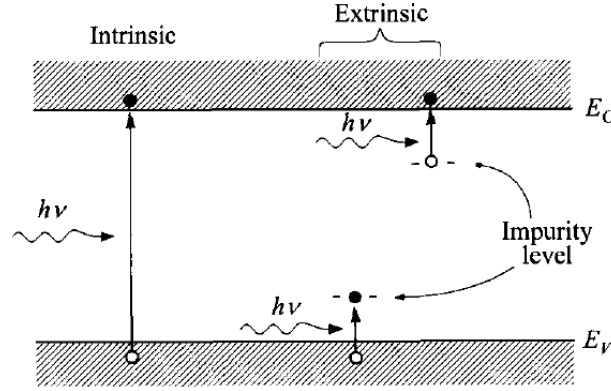
$$I_p = \sigma \mathcal{E} W D = q \eta \frac{P_{opt}}{h\nu} \frac{(\mu_n + \mu_p) \tau_n \mathcal{E}}{L} \quad (8)$$

ניתן להגדיר "פוטו-זרם עיקרי" בתור הזרם שנוצר כאשר כל נשאי המטען שעברו פוטוגנרציה נאספים. על פי משוואה (5) הזרם הזה, אשר מסומן I_{ph} שווה ל:

$$I_{ph} = q W L D G_e = q \eta \frac{P_{opt}}{h\nu} \quad (9)$$

ומכאן ניתן להגדיר את ההגבר של ההתקן, G_a , להיות:

$$G_a = \frac{I_p}{I_{ph}} = \frac{(\mu_n + \mu_p) \tau_n \mathcal{E}}{L} = \tau_n \left(\frac{1}{\tau_{rn}} + \frac{1}{\tau_{rp}} \right) \quad (10)$$



איור 3: עירור נשאי מטען בתהליך אינטרינזי- מפס הערכיות לפס ההולכה, ואקסטרנזי- בין פסי האנרגיה ורמות בתוך פס האסור.

כאשר t_{rp} ו t_{rn} הם משכי הזמן שלוקח לאלקטרונים וחורים לחצות את ההתקן. קל לראות כי ההגבר תלוי ביחס בין משך הזמן בו נשאי מטען חוצים את ההתקן לזמן החיים שלהם. על מנת שההגבר יהיה גבוה, נדרש כי המרחק בין האלקטרודות יהיה כמה שיותר קטן, וזמן החיים יהיה כמה שיותר גבוה. יחסית קל ליצור התקנים בהם ההגבר הוא 1000 וניתן להגיע להגברים של עד מיליון.

ההגבר של פוטו- מוליכים מוגבל על ידי השדה המקסימלי אשר יגרום לפריצה, ועל ידי תופעה נוספת אשר נקראת sweep out. גם תחת שדה לא חזק מאוד, לנשאי הרוב יש מוביליות גבוהה יותר ולכן זמן המעבר שלהם דרך ההתקן (t_{rn} עבור חומר מסוג n) יהיה קצר יותר. לעומת זאת, זמן המעבר דרך ההתקן של נשאי המיעוט, יהיה ארוך יותר מזמן החיים. במקרה הזה, נשאי רוב יעזבו את ההתקן מהר יותר מנשאי מיעוט. לכן, יכול להיות מצב בו נשאי רוב יעזבו את ההתקן לפני נשאי המיעוט. במצב זה, נשאי רוב חדשים יוזרקו אל ההתקן דרך המגעים על מנת לשמור על ניטרליות המטען. בצורה כזו, נשאי רוב יעברו דרך ההתקן פעמים רבות במשך זמן החיים שלהם (זו הסיבה שההגבר גדול מ-1). עבור שדה מספיק גבוה, גם חורים יעברו דרך ההתקן בזמן אשר קצר מזמן החיים שלהם. במצב זה, קצב הגנרציה יהיה נמוך מהקצב שבו נשאי מטען מפונים מההתקן והמצב המתמיד שהנחנו כבר לא מתקיים. כתוצאה מכך, נוצר אפקט מטען מרחבי (Space charge) אשר מקטין את ההגבר.

כאמור, ההגבר של פוטו-מוליכים גדל ככל שמגדילים את זמן החיים של נשאי המטען. עם זאת, כאשר מכבים את מקור האור, ריכוז נשאי המטען יורד אקספוננציאלית על פי זמן החיים שלהם:

$$n(t) = n(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad (11)$$

על כן, זמן התגובה של ההתקן עולה עם זמן החיים. מכאן שבהתקנים אלו יש פשרה בין זמן תגובה נמוך והגבר. בדרך כלל, זמני התגובה של פוטו-מוליכים יהיו ארוכים בהרבה מאלו של פוטו-דיודות. מאחר והזרם ליניארי עם ריכוז הנשאים, קל לראות כי התגובה להארה המאופננת כגל מרובע תהיה למעשה רוויה ודעיכה אקספוננציאלית עם קבוע זמן השווה לזמן החיים $J \propto \exp(-t/\tau_n)$. על כן, תגובת התדר של התקנים אלו תהיה מהצורה:

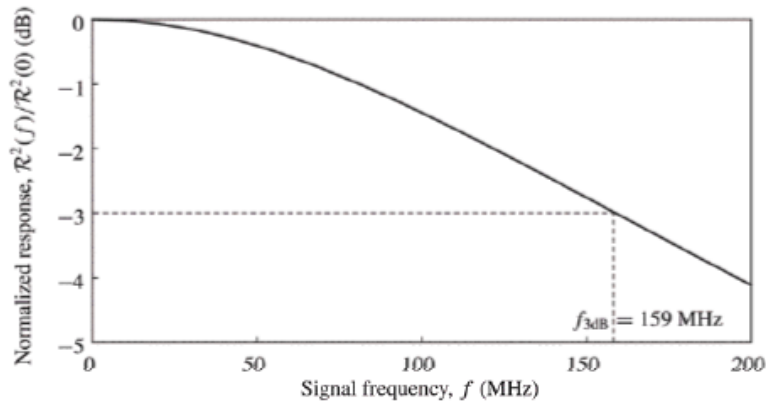
$$\frac{\mathcal{R}(j\omega)}{\mathcal{R}(0)} = \frac{1}{1 + j\omega\tau_n} \quad (12)$$

במקרים רבים אנו מעוניינים בספקטרום ההספק החשמלי אשר יהיה מהצורה:

$$\frac{\mathcal{R}(j\omega)^2}{\mathcal{R}(0)^2} = \frac{1}{1 + (\omega\tau_n)^2} \quad (13)$$

נניח כי האות האופטי הפוגע בהתקן מאופנן על ידי העוצמה שלו והוא נתון על ידי:

$$P(\omega) = P_{opt}[1 + m \exp(j\omega t)] \quad (14)$$



איור 4: דוגמא לתגובת תדר של פוטו-מוליך. התגובה מנורמלת על פי ההספק החשמלי בתדר נמוך. זמן החיים עבור התקן זה או 1 ננו-שניות.

כאשר m מציין את עומק המודולציה ו- ω היא תדירות האות. הזרם הממוצע I_p כתוצאה מהאות מתקבל בעזרת משוואה (8). הספק ה-RMS של האות המאופנן הוא $mP_{opt}/\sqrt{2}$ וערך ה-RMS של האות החשמלי הוא בערך:

$$I_p = \frac{q\eta m P_{opt} G_a}{\sqrt{2} h \nu} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_n^2}} \quad (15)$$

קל לראות כי בתדרים נמוכים ביטוי זה מתכנס למשוואה (8), וכי בתדרים גבוהים הזרם יורד לפי $1/f$. את רוחב הסרט, B , ניתן למצוא על ידי מציאת תדר האות בו הזרם הוא חצי מהזרם תחת תדר נמוך:

$$B = f_{3dB} = \frac{1}{2\pi\tau_n} \quad (16)$$

איור 4 מציג דוגמא לתגובת תדר של פוטו-מוליך בו זמן החיים של נשאי המטען הוא ננו-שנייה אחת. מתוך משוואות (10) ו-(16) קל לראות כי בפוטו-מוליכים מכפלת ההגבר ברוחב הפס היא למעשה קבוע. מכפלה זו, gain-bandwidth product, מדגימה את שוב את הפשרה בין מהירות התגובה של התקן להגבר שלו.

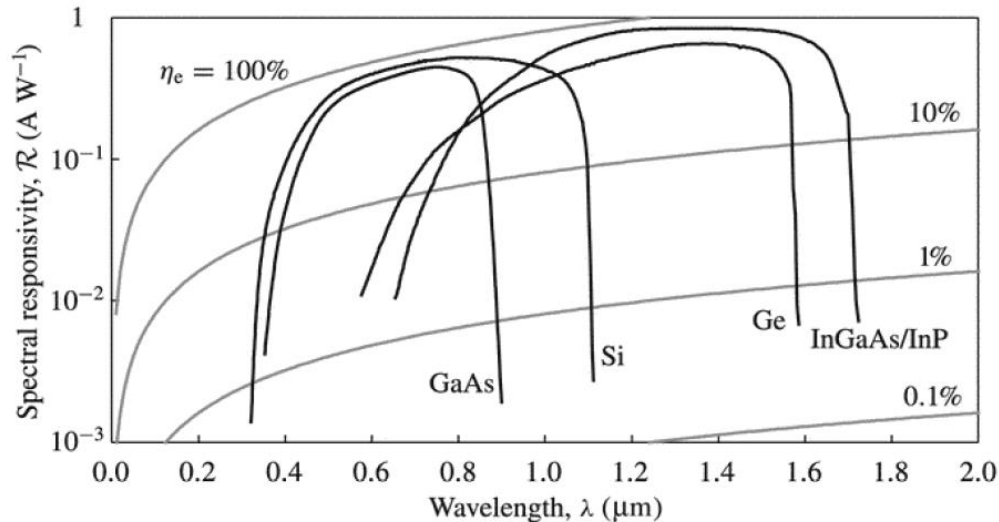
פוטו-דיודות

פוטו-דיודות הן התקנים מבוססי דיודות המשמשות לחישת אור. באזור מיחסור של התקנים אלו יש שדה חשמלי חזק אשר מפריד בין אלקטרונים וחורים. על מנת לקבל תגובה מהירה, אזור המיחסור חייב להיות דק מספיק בשביל לצמצם את הזמן שלוקח לנשאי מטען לחצות אותו. עם זאת, על מנת להגדיל את היעילות הקוואנטית (היחס בין זרם האלקטרונים לשתף הפוטונים על הדוגמא), על אזור המיחסור להיות מספיק רחב בכדי לאפשר לחלק גדול מנשאי המטען שנוצרים להיאסף על ידי המגעים. על כן, בדומה לפשרות שיש בתכנון פוטו-מוליכים, גם בפוטו-דיודות יש צורך להגיע לפשרה בין יעילות קוואנטית ומהירות תגובה.

עבור חישה באור הנראה ובאינפרא אדום הקרוב, פוטו-דיודות בדרך כלל ממותחות בממתח הפוך (שלילי) המאפשר להקטין את זמן המעבר של נשאי מטען בדיודה ומקטין את הקיבול שלה. בפוטו-דיודות רגילות, נקפיד שהמתח יהיה מספיק נמוך בשביל להימנע מתהליכי מפולת. לכן, לפוטו-דיודות רגילות יש הגבר מקסימלי של 1. ישנן כמה סוגים של פוטו-דיודות: פוטו-דיודות מסוג p-i-n, p-n, הטרזצמיתים, וצמתי מתכת – מל"מ. ראשית נבחן את המאפיינים הכלליים של פוטו-דיודות: היעילות הקוואנטית שלהן, מהירות התגובה שלהן, והרעש שלהן.

יעילות קוואנטית

כפי שהוסבר קודם, היעילות הקוואנטית של פוטו-דיודות היא היחס בין שתף האלקטרונים לשתף הפוטונים שפוגע בהן כמתואר במשוואה (2). פרמטר אחר בעל חשיבות הוא הרספונסיביות שהיא היחס בין הזרם הנמדד להספק האופטי כמתואר במשוואה (3). מאחר ומקדם הבליעה של חומרים, α משתנה מאוד עם אורך הגל, גם היעילות הקוואנטית והרספונסיביות ישתנו עם אורך הגל ותחום אורכי הגל בו פוטו-דיודה יכולה לעבוד הוא מוגבל. רוב הפוטו-דיודות מבוססות על מעבר של אלקטרון



איור 5: הרספונסיביות של פוטודיודות מחומרים שונים כתלות באורך הגל הפוגע. העקומות האפורות מסמנות את הרספונסיביות המתקבלת עבור ערכים שונים של יעילות קוואנטית.

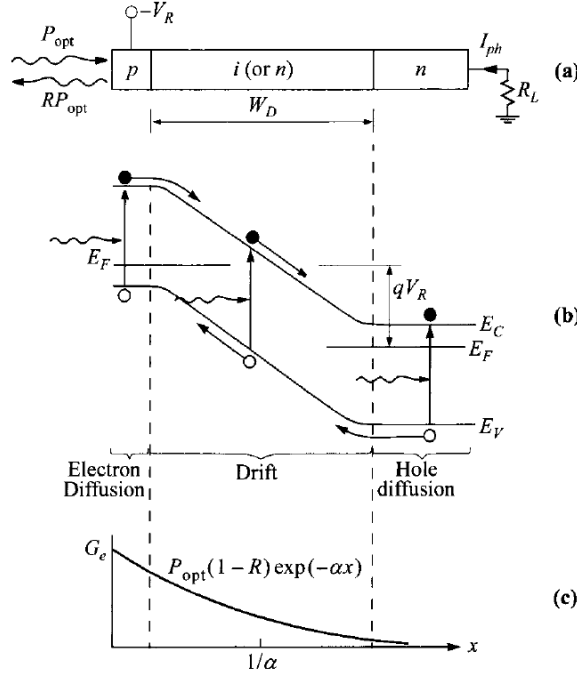
מפס הערכיות אל פס ההולכה. על כן, אורך הגל הארוך ביותר שניתן לחוש יקבע על ידי הצבה של רוחב הפס האסור במשוואה (1). לדוגמא, עבור פוטו-דיודות מגרמניום אורך הגל המקסימלי יהיה 1.7 מיקרון, ובסיליקון 1.1 מיקרון. עבור אורכי גל ארוכים יותר, מקדם הבליעה נמוך מכדי ליצור אות משמעותי. התגובה של פוטו-דיודות מוגבלת גם באורכי גל קצרים יותר. פוטונים בעלי אורך גל קצר מאוד יבלעו בסמוך לפני השטח שם יש סיכוי גבוה יותר לעבור רקומבינציה. בנוסף, ציפויים אנטי-רפלקטיביים אשר מתוכננים עבור האור הנראה במקרים רבים בולעים פוטונים בתחום האולטרה סגול. עבור תחום האינפרא אדום הקרוב, היעילות הקוואנטית של פוטו-דיודות מסיליקון יכולה להגיע לכמעט 100%. בתחום 1-1.6 מיקרון, לפוטו-דיודות עשיות גרמניום, וסגסוגות III-V כמו InGaAsP יש יעילות קוואנטית גבוהה. עבור אורכי גל ארוכים יותר, נדרש לקרר פוטו-דיודות על מנת לשמור על יעילות קוואנטית גבוהה.

מהירות תגובה

מהירות התגובה של פוטו-דיודות מוגבלת על ידי שלושה גורמים: זמן הסחפה דרך אזורי המיחסור, הדיפוזיה של נשאי המטען מחוץ לאזור המיחסור, והקיבול של שכבת המיחסור. נשאי מטען אשר נוצרים מחוץ לאזור המיחסור נדרשים להגיע עד לקצה אזור המיחסור בדיפוזיה, וזהו תהליך שגורם להשהיה. על מנת לצמצם את תהליך הדיפוזיה, בדרך כלל יוצרים את הצומת בסמוך לפני השטח בו פוגע האור, והצומת מתוכנן כך שרוב האור יבלע בתוך אזור המיחסור. לשם כך נדרש שרוחב אזור המיחסור יהיה בערך α^{-1} . במצב זה, תנועת רוב נשאי המטען שנוצרים תיקבע על ידי סחפה שהיא תהליך מהיר בהרבה מדיפוזיה. למעשה, אם המתח המופעל מספיק גבוה, תנועת נשאי המטען תהיה במהירות הרוויה שלהם. עם זאת, רוחב אזור המיחסור לא יכול להיות רחב מידי שכן הדבר יגדיל את משך הזמן שלוקח לנשאי מטען לחצות אותו. מגבלה נוספת על רוחב אזור המיחסור נובעת מהקיבול שלו, אשר גדל ככל שאזור המיחסור קטן. קיבול זה יוסיף קבוע זמן של CR_L לערכת כאשר R_L הוא התנגדות העומס. הפשרה המקובלת לכל המגבלות האלו היא בחירה של רוחב אזור מיחסור כך שמשך הזמן שלוקח לנשאי מטען לעבור אותו הוא בערך חצי מזמן המחזור של המודולציה של האור. לדוגמה, עבור מודולציה בתדר של 10 GHz, רוחב אזור המיחסור האופטימלי בסיליקון בו נשאי מטען נעים במהירות הרוויה שלהם (10^7 cm/s) הוא חמישה מיקרון.

צמתי p-n, p-i-n ו-n-i-p

פוטו-דיודות המבוססות על צמתי n-i-p הן חיישני האור השכיחים ביותר. הסיבה לכך היא שעל ידי קביעת התכונות של השכבה האינריזית (עובי ומידת סימון), ניתן לשלוט בעובי שכבת המיחסור ועל ידי כך להביא ליעילות קוואנטית ותגובת תדר מיטביים. איור 6 מציג את המבנה של פוטו-דיודה כזאת, את דיאגרמת הפסים שלה ואת התפלגות הפוטוגנרציה בתוכה. כאשר אור נבלע בהתקן, נוצרים בו זוגות אלקטרון-חור. זוגות כאלו אשר נוצרים בתוך אזור המיחסור מופרדים על ידי השדה החשמלי.



איור 6: פוטו-דיודה המבוססת על צומת n-i-p מבנה (a), דיאגרמת פסים (b), והתפלגות הפוטוגנרציה (c).

באופן דומה, נשאי מיעוט אשר נוצרים בערך מרחק דיפוזיה אחד מקצה אזור המיחסור יוכלו להגיע אל קצה אזור המיחסור בדיפוזיה ומשם להיאסף על ידי השדה. כתוצאה מהפרדת נשאי המטען זרם חשמלי עובר דרך ההתקן.

יעילות קוואנטית

על מנת לחשב את היעילות הקוואנטית של ההתקן, עלינו למצוא את מספר נשאי המטען אשר נוצרו בפוטוגנרציה אשר תורמים לזרם החשמלי. נמצא את התרומה לזרם באזור המיחסור J_{dr} ואת התרומה לזרם באזורים הקוואנטי נטראליים J_{diff} .

$$J_{tot} = J_{dr} + J_{diff} \quad (17)$$

נניח כי ניתן להזניח גנרציה תרמית, וכי עובי שכבת ה-p בסמוך לפני השטח קטן מאוד יחסית לעומק הבליעה $1/\alpha$. על פי חוק Beer Lambert, הפוטוגנרציה בהתקן תהיה:

$$G_e(x) = \Phi_0 \alpha \exp(-\alpha x) \quad (18)$$

כאשר Φ_0 הוא שתף הפוטונים ליחידת שטח:

$$\Phi_0 = \frac{P_{opt}}{A h \nu} (1 - R) \quad (19)$$

כאן R מסמן את ההחזרה מפני השטח של ההתקן, ו- A מסמן את השטח שלו. בהנחה שאין רקומבינציה באזור המיחסור, כל נשאי המטען שנוצרים בו יאספו ויתרמו לזרם ולכן:

$$J_{dr} = -q \int_0^{W_D} G_e(x) dx = q \Phi_0 [1 - \exp(-\alpha W_D)] \quad (20)$$

כאשר W_D היא רוחב האזור האינטרינזי. אנו מניחים כי אזור זה ממוחסר לחלוטין ואילו עובי שכבות המיחסור באזורים ה-n וה-p זניח יחסית אליו. באזורים הקוואנטי נטראליים, הזרם נקבע על ידי דיפוזיה של נשאי מיעוט (במקרה הזה חורים):

$$D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + G_e(x) = 0 \quad (21)$$

בהנחה שכל נשאי המטען נאספים בקצה אזור המיחסור, וכי ההתקן עבה מאוד, ריכוז נשאי המיעוט יהיה 0 בקצה אזור המיחסור, והוא יהיה שווה לערכו בשיווי משקל עבור $x \rightarrow \infty$. מכאן מתקבל הפתרון:

$$p_n(x) = p_{n0} - [p_{n0} - C_1 \exp(-\alpha W_D)] \exp\left(\frac{W_D - x}{L_p}\right) + C_1 \exp(-\alpha x) \quad (22)$$

כאשר L_p הוא אורך הדיפוזיה, ו-

$$C_1 = \frac{\Phi_0}{D_p} \frac{\alpha L_p^2}{1 - \alpha^2 L_p^2} \quad (23)$$

נמצא את זרם הדיפוזיה:

$$J_{diff} = qD_p \left. \frac{\partial p_n}{\partial x} \right|_{x=W_D} = q\Phi_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} \exp(-\alpha W_D) + \frac{qp_{n0}D_p}{L_p} \quad (24)$$

סך כל הזרם יהיה סכום הזרמים באזור המיחסור ובאזור הקוואזי-ניטרלי:

$$J_{tot} = q\Phi_0 \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] + \frac{qp_{n0}D_p}{L_p} \quad (25)$$

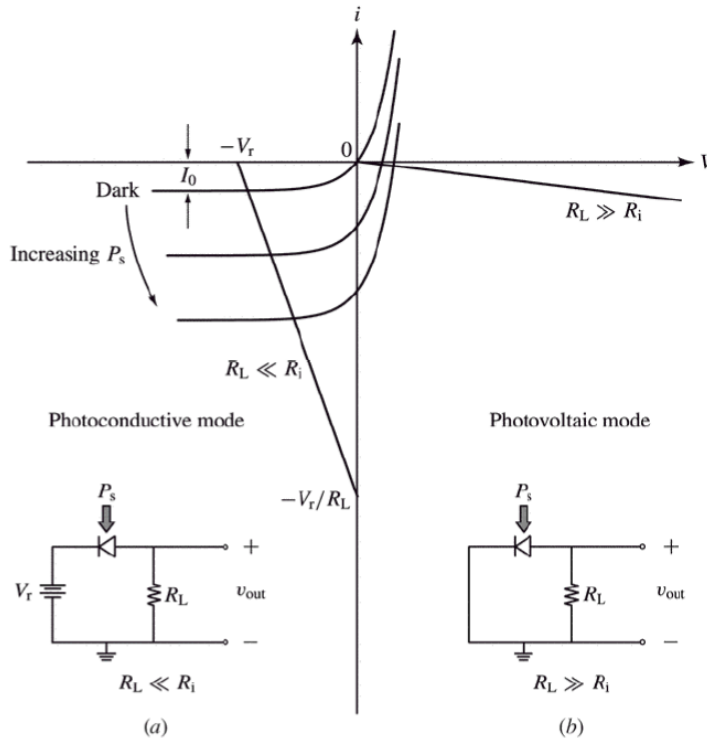
נשים לב כי האיבר הראשון הוא תוצר של התגובה לאור, ואילו האיבר השני הוא זרם החושך בדיודה. קל לראות כי איבר זרם החושך הוא בדיוק זרם הרוויה בצומת n^+ . מאחר ורוחב אזור המיחסור נקבע בעיקר על ידי רוחב השכבה האינטרינזית, איבר הפוטו-זרם יהיה קבוע עם מתח ההתקן, ואילו איבר זרם החושך יהיה בדיוק הזרם בדיודה רגילה:

$$J_{tot} = -q\Phi_0 \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] + \frac{qp_{n0}D_p}{L_p} \left(e^{\frac{qV_a}{kT}} - 1 \right) \quad (26)$$

השינוי בסימן של איבר הפוטו-זרם נעשה על מנת שאופייני המתח-זרם של הפוטו-דיודה יהיו ברביעים בהם אנו רגילים לנתח דיודות. איור 7 מציג באופן מקורב אופיינים של פוטו-דיודת תחת עוצמות הארה שונות ומעגלים למדידת עוצמת האור הפוגע בהן.

בתנאים סטנדרטיים, תרומת זרם החושך קטנה בהרבה מאשר הפוטו-זרם. בהזנחת זרם החושך, ניתן לחשב את היעילות הקוואנטית של הפוטו-דיודה:

$$\eta = \frac{AJ_{tot}h\nu}{qP_{opt}} = (1 - R) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_p} \right] \quad (27)$$



איור 7: אופייני מתח זרם של פוטו-דיודות ומעגלים למדידת עוצמת האור הפוגע בהן.

מכאן ניתן לראות כי הגורמים אשר פוגעים ביעילות הקוואנטית הם החזרה של אור מפני השטח ורקומבינציה באזור הקוואנטי ניטראלי אשר באה לידי ביטוי במכפלה αL_p . על כן, על מנת להגדיל את היעילות הקוואנטית, ניתן לצמצם את הבליעה באזור הקוואנטי ניטראלי על ידי הגדלה של אזור המיחסור כך ש $\alpha W_D \gg 1$. עם זאת, ככל שנגדיל את אזור המיחסור, נגדיל גם את הזמן שלוקח לנשאי מטען לעבור דרכו ולכן נפגע בביצועי החיישן בתדר גבוה.

תגובת תדר

מאחר ולנשאי מטען לוקח פרק זמן סופי לחצות את אזור המיחסור, יהיה הפרש פאזה בין האות האופטי וזרם האור כאשר שתף הפוטונים מתנדנד בתדר גבוה. על מנת להעריך את האפקט הזה, נבחן את המקרה הפשוט המתואר באיור 8 בו אנו מניחים כי כל האור נבלע בסמוך לפני השטח של ההתקן. כמו כן, אני מניחים כי המתח המופעל מספיק בשביל לגרום למיחסור של ההתקן כולו וכי מהירות נשאי המטען ליניארית עם השדה על שהם מגיעים למהירות הרוויה שלהם. עבור שתף מהצורה $\Phi_1 \exp(j\omega t)$ (ביחידות של פוטונים ליחידת שטח לשנייה), ובהנחה של יעילות קוואנטית של 1, זרם ההולכה (הזרם שהוא תוצר של נשאי מטען שחוצים את ההתקן) בנקודה כלשהי בהתקן הוא:

$$J_{cond} = q\Phi_1 \exp\left(j\omega\left(t - \frac{x}{v_d}\right)\right) \quad (28)$$

כאשר $v_d = \mu\mathcal{E}$ לכל שדה הקטן מהשדה הקריטי, ו- $v_d = v_s$ עבור שדה הגדול מהשדה הקריטי. מתוך משוואה (28) אנו רואים כי הזרם בתוך ההתקן משתנה במרחב ובזמן. סך כל הזרם שווה לזרם ההולכה, ולזרם ה- displacement אשר נוצר כתוצאה משינויים בשדה החשמלי בהתקן. בהנחה שבתוך אזור המיחסור סך כל הזרם הוא קבוע $\nabla \cdot J_{tot} = 0$, ובפרט הזרם שווה לזרם הממוצע הזרם בהתקן:

$$J_{tot} = \frac{1}{W_D} \int_0^{W_D} \left(J_{cond} + \frac{\epsilon_s \partial \mathcal{E}}{\partial t} \right) dx \quad (29)$$

איבר ה- displacement הוא תוצר של שינוי בשדה החשמלי בהתקן כתוצאה משינוי בריכוז הנשאים בתוכו (המתח המופעל קבוע). אנו נניח שההשפעה הזו קטנה ולכן נזניח את איבר זה. נציב את הביטוי לזרם ההולכה ונבצע את האינטגרציה.

$$J_{tot} = \frac{1}{W_D} \int_0^{W_D} q\Phi_1 e^{j\omega\left(t - \frac{x}{v_s}\right)} dx = \frac{q\Phi_1}{W_D} e^{j\omega t} \int_0^{W_D} e^{-j\omega \frac{x}{v_s}} dx \quad (30)$$

נקבל כי:

$$J_{tot} = \frac{q\Phi_1 v_s}{j\omega W_D} e^{j\omega t} \left(1 - e^{-j\omega \frac{W_D}{v_s}} \right) = \frac{q\Phi_1}{j\omega t_r} (1 - e^{-j\omega t_r}) e^{j\omega t} \quad (31)$$

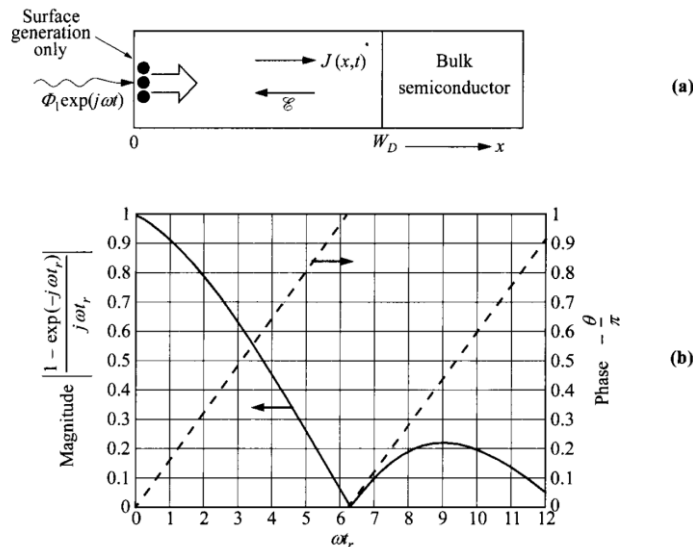
כאשר $t_r = W_D/v_d$ הוא זמן החצייה של נשאי המטען את ההתקן. בהנחה שהשדה החשמלי קטן מהשדה הקריטי, וכי השדה קבוע בתוך האזור האינטרינזי (צפיפות המטען בו נמוכה), השדה החשמלי הוא:

$$\mathcal{E} = \frac{\psi_{bi} - V_a}{W_D} \quad (32)$$

וזמן החצייה של נשאי מטען את ההתקן הוא:

$$t_r = \frac{W_D}{\mu\mathcal{E}} = \frac{W_D^2}{\mu(\psi_{bi} - V_a)} \quad (33)$$

באיור 8 מציג את ההגבר והפאזה של פוטו-דיודה המתקבלים ממשוואה (31) כאשר התדירות מנורמלת לפי זמן החצייה של ההתקן. קל לראות כי האמפליטודה קטנה עם המכפלה ωt_r כך שכל שזמן החצייה גדול יותר, דרוש תדר עבודה נמוך יותר על מנת לשמור על ההגבר של ההתקן. עבור $\omega t_r = 2.78$ ההגבר של ההתקן הוא $1/\sqrt{2}$ ופאזה היא 0.44π . על כן, זמן התגובה של הפוטו-דיודה מוגבל על ידי משך הזמן שלוקח לנשאי מטען לחצות אותה. כפי שראינו קודם, בתכנון הפוטו-דיודה יש להגיע לפשרה בין אזור אינטרינזי רחב, המאפשר בליעה מלאה של אור, ואזור צר אותו נשאי מטען



איור 8: (a) מבנה הפוטו-דיודה עבור ניתוח זמן המעבר של נשאי מטען. (b) התגובה לאור – הגבר ופאזה מנורמלים, כתלות בתדר המודולציה מנורמל לפי זמן המעבר של נשאי מטען בהתקן, $\theta = \omega t_r / 2$.

יכולו לחצות במהירות ועל ידי כך לאפשר עבודה בתדר גבוה. מקובל לבחור את רוחב האזור האינטרינזי להיות בין $1/\alpha$ ו- $2/\alpha$.

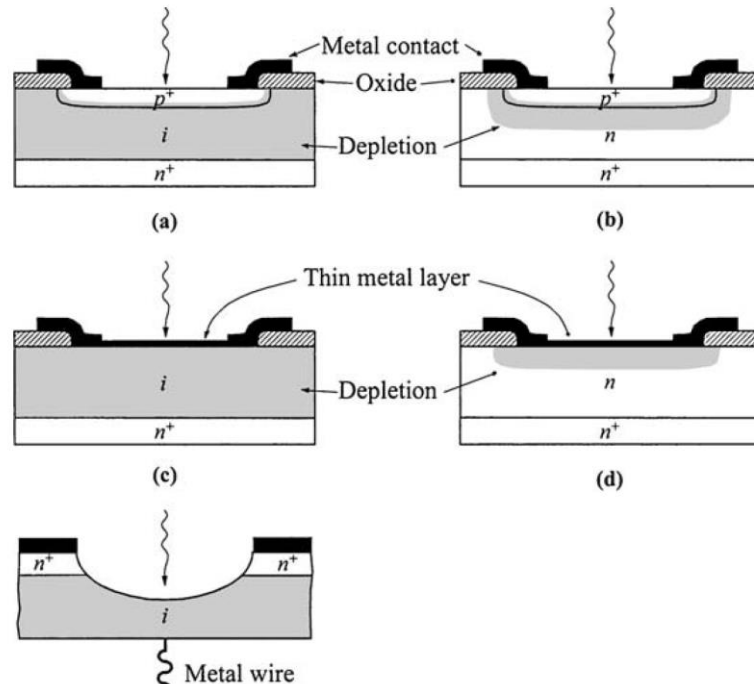
נניח כי רוחב האזור האינטרינזי הוא $1/\alpha$, וכי נשאי המטען נעים במהירות הרוויה שלהם. נקבל כי רוחב הסרט של הדיודה הוא:

$$B = f_{3dB} = \frac{2.78}{2\pi t_r} \approx \frac{0.44v_s}{W_D} \approx 0.44\alpha v_s \quad (34)$$

איור 10 מציג את היעילות הקוואנטית (מנורמלת לכמות האור החודרת להתקן) עבור פוטו-דיודה עשויה סיליקון כתלות ברוחב הסרט שלה ואורך הגל של האור הפוגע. כאמור, עובי האזור האינטרינזי מגדיר את משך הזמן שלוקח נשאי מטען לחצות אותו ולכן גם את רוחב הסרט של ההתקן. עם זאת, עובי אזור זה מגדיר גם את כמות האור שנבלעת באזור האינטרינזי ולכן גם את היעילות הקוואנטית שלו. העקומות מדגימות את הפשרה בין רוחב הסרט של הפוטו-דיודה והיעילות הקוואנטית שלה.

דרך אחת לעקוף את הפשרה הזו היא להאיר את הפוטו-דיודה מהצד. במצב זה, ניתן לצמצם את עובי השכבה האינטרינזית מבלי לצמצם את הבליעה בהתקן. גישה זו שימושית כאשר מעוניינים בחישה של אור באורכי גל הקרובים לאורך הגל המתאים לרוחב הפס האסור עבורו מקדם הבליעה נמוך. לדוגמא, בסיליקון, מקדם הבליעה עבור אורך גל של מיקרון אחד הוא $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ כך שנדרש התקן בעובי של מילימטר אחד בכדי לבלוע 63% מהאור החודר להתקן. החיסרון בגישה זו הוא במורכבות הטכנית שלה שכן היא דורשת הארה מהצד של פרוסת סיליקון שהיא בדרך כלל דקה למדי. באופן דומה, ניתן להאיר על ההתקן בזווית או ליצור משטח מפזר על פני השטח של ההתקן. בצורה זו ניתן להביא לבליעה של חלק גדול יותר המאור בשכבה דקה יותר.

איור 9 מציג באופן סכימאטי כמה מבנים עבור פוטו-דיודות. בדרך כלל יש לפוטו-דיודות גם ציפוי אנטי-רפלקטיבי במטרה לצמצם את כמות האור שמוחזר מהן. האיור לא כולל את ציפויים אלו. איור 9a מציג פוטו-דיודה מסוג p-i-n. כאמור בהתקנים אלו, עובי השכבה האינטרינזית נבחר בהתאם לאורך הגל הפוגע, ותדר המודולציה שלו. איור 9b מתאר פוטו-דיודה המבוססת על צומת p-n. מאחר ובמבנים אלו אזור המיחסור צר יותר, בהתקנים אלו תהיה בליעה משמעותית יותר של אור באזורים הקוואנטיזציה ניטראליים. לבליעה באזורים אלו יכולים להיות כמה חסרונות. ראשית, אם האור נבלע במרחק הגדול מאורך הדיפוזיה מאזור המיחסור, נשאי המטען שנוצרו בפוטו-גנרציה יעברו רקומבינציה ולא יתרמו לזרם. כתוצאה מכך היעילות הקוואנטית של ההתקן תיפגע. שנית, תהליכי דיפוזיה הם איטיים יותר מתהליכי סחיפה. על ידי פתרון של משוואת הדיפוזיה, המתאימה לתיאור תנועת נשאי מטען כאשר אין שדה חשמלי, ניתן להראות כי משך הזמן הדרוש לנשאי מיעוט בכדי לעבור מרחק x הוא:



איור 9, מבנים שונים של פוטו-דיודות: (a) פוטו-דיודת p-i-n, (b) פוטו-דיודת p-n, (c) פוטו-דיודת n-i, (d) פוטו-דיודת מתכת-מל"מ, (e) פוטו-דיודת עם מגעים נקודתיים.

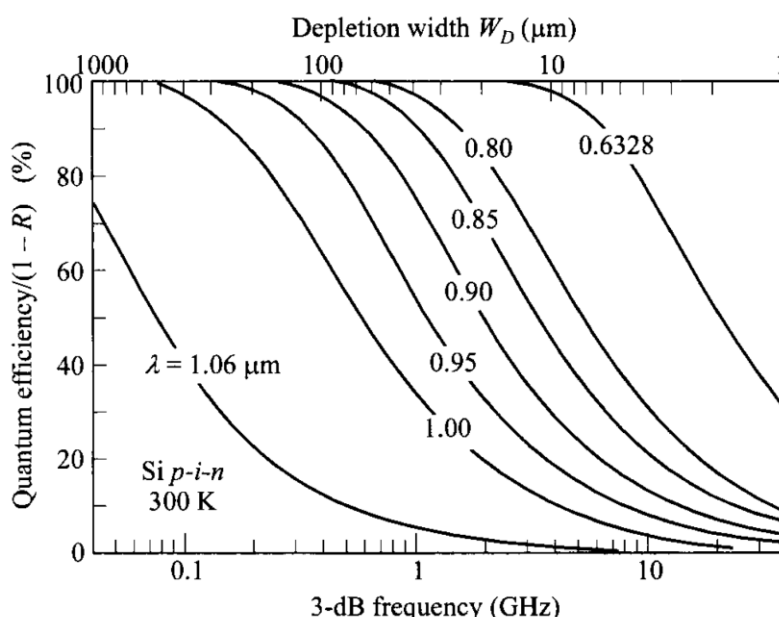
$$t = \frac{4x^2}{\pi^2 D_p} \quad (35)$$

מאחר ומשך זמן זה גדול בהרבה ממשך הזמן שלוקח לנשאי מטען לעבור מרחק דומה באמצעות סחיפה, לפוטו-דיודות המבוססות על מנגנון זה יש תגובה איטית יותר מאשר לפוטו-דיודות מסוג p-i-n. בנוסף לאלו, האזור הקוואנטי ניטרלי גם תורם להתנגדות טורית אשר מהווה מקור לרעש כמו שניראה בהמשך.

פוטו-דיודות המבוססות על מגע מתכת-מל"מ

ניתן להשתמש במגעי מתכת-מל"מ על מנת לבנות פוטו-דיודות. התקנים כאלו יכולים להמיר את פוטוני לאות חשמלי בעזרת שני מנגנונים- בליעה של פוטונים בעלי אנרגיה הגבוהה מרוחב הפס האסור ויצירה של זוגות אלקטרון-חור, ובליעה של פוטונים בעלי אנרגיה הנמוכה מרוחב הפס האסור בתוך שכבת המתכת ואיסוף של נשאי מטען מעוררים בעזרת מנגנון internal photoemission.

כידוע, ניתן ליצור מגע מתכת מל"מ בו הפרש פונקציות העבודה בין המל"מ והמתכת גורם כיפוף פסים ותכונות חשמליות הדומות לדיודה. כאשר פוטונים בעלי אנרגיה הגבוהה מרוחב הפס האסור נבלעים במוליך למחצה הם יוצרים זוגות אלקטרון- חור. בדומה לפוטו- דיודה מסוג p-i-n, אם תהליך הגנרציה הוא בתוך אזור המיחסור של מגע המתכת מל"מ, השדה החשמלי באזור המיחסור יגרום להפרדה של הנשאים. במידה והאור נבלע מחוץ לאזור המיחסור, נשאי מיעוט יכולים לנוע בדיפוזיה אל אזור המיחסור ואז להיאסף על ידי השדה. על כן, התקן כזה מאוד דומה בפעולה שלו לצומת מסוג p-i-n והיעילות הקוואנטית שלו נקבעת על פי משוואה (27). איור 11a מציג את דיאגרמת הפסים של פוטו-דיודה מבוססת מגע מתכת מל"מ כאשר נבלע בה פוטון עם אנרגיה הגבוהה מרוחב הפס האסור. כאשר הממתח ההפוך על התקנים אלו מספיק גבוה, יכולים להתרחש בהתקן תהליכי הכפלת נשאי מטען באמצעות impact ionization. הכפלה זו תגרמו לתהליכי מפולת Avalanche בהם נשאי מטען מעוררים נשאי מטען נוספים ואלו בתום מעוררים עוד נשאי מטען. מנגנון זה יוצר הגבר של האות האופטי שכן מספר זוגות האלקטרון חור (והזרם שהם מעבירים) גדול ממספר הפוטונים שנבלע בהתקן. התקנים אשר מבוססים על מנגנון זה נקראים Avalanche photodiode ומשתמשים בהם לצורך חישה של אותות אופטיים חלשים.



איור 10: היעילות הקוואנטית של פוטו-דיודה p-i-n מסיליקון עבור מספר אורכי גל. רוחב הסרט של הפוטו-דיודה מוגבל על ידי זמן החצייה של נשאי המטען את אזור המיחסור. מהירות הרוויה היא 10^7 cm/s .

כאשר פוטון נבלע בשכבת המתכת הוא גורם לעירור של אלקטרון. בניגוד למוליכים למחצה בהם האלקטרונים המעוררים יכולים לשהות פרקי זמן ארוכים בתחתית פס ההולכה, במתכת אין פס אסור והאלקטרונים המעוררים, אשר מכונים גם אלקטרונים חמים, מאבדים את האנרגיה שלהם במהירות רבה לפונונים וחוזרים לאנרגיה שלהם בשווי משקל (רמת פרמי). עם זאת, במידה והעירור של האלקטרון נעשה קרוב לממשק בין שכבת המתכת והמל"מ, לאלקטרונים יש מומנטום בכיוון הממשק, והאנרגיה של האלקטרון המעורר גבוהה יותר ממחסום הפוטנציאל בין השכבות, יש סיכוי שהאלקטרון יעבור אל פס ההולכה במוליך למחצה. תהליך זה נקרא Internal photoemission והוא מתואר באיור 11b. במנגנון זה נעשה שימוש נרחב עבור אפיון של גובה מחסום הפוטנציאל במגעי מתכת מל"מ וכן לחקר תנועת אלקטרונים חמים במתכות. היעילות הקוואנטית של תהליך זה תלויה באורך הגל של הפוטון הפוגע והיא נתונה על ידי:

$$\eta = C_F \frac{(h\nu - q\phi_B)^2}{h\nu} \quad (36)$$

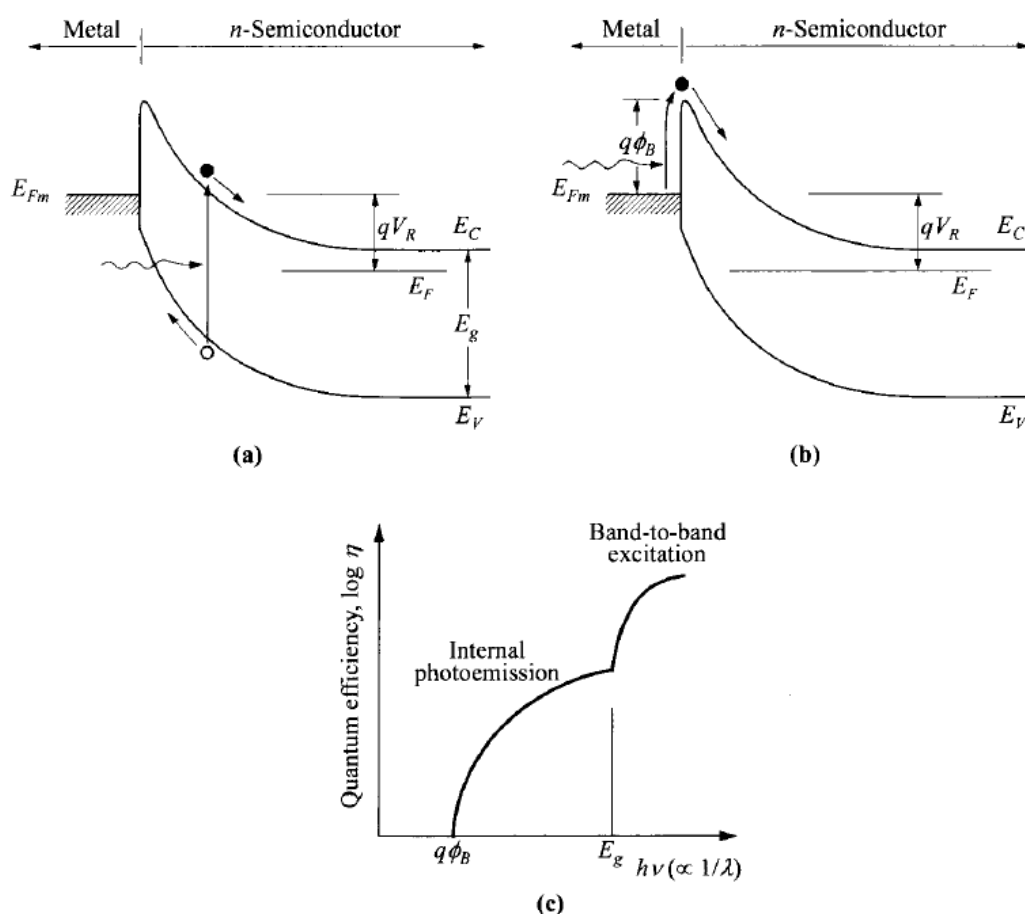
כאשר ϕ_B הוא גובה מחסום הפוטנציאל, ו- C_F הוא קבוע פאולר לפליטה (Fowler emission coefficient) והוא תלוי בסוג החומרים המרכיבים את ההתקן. קל לראות כי התקנים אלו יכולים לחוש פוטונים בעלי אנרגיה הגבוהה מגובה מחסום הפוטנציאל בצומת, וכי היעילות הקוואנטית שלהם עולה עם האנרגיה של הפוטונים הפוגעים. כאשר האנרגיה של הפוטונים הפוגעים מגיעה לרוחב הפס האסור במל"מ הם יתחילו להיבלע בו. מכיוון שתהליך זה יעיל בהרבה מאשר internal photoemission, היעילות הקוואנטית של ההתקן תעלה באופן משמעותי עבור פוטונים אלו. איור 11c מציג את היעילות הקוואנטית של התקנים אלו. ברוב המקרים, היעילות הקוואנטית עבור פוטונים בעלי אנרגיה הנמוכה מרוחב הפס האסור היא פחות מ-1%.

איור 9c מתאר את מבנה סטנדרטי של פוטו-דיודה המבוססת על מגע מתכת מל"מ. על מנת להימנע מהפסדים בגלל בליעת אור במתכת והחזרת אור ממנה כאשר ההתקן מואר מכיוון הצד המתכתי, עובי שכבת המתכת הוא כעשרה ננומטר, ומעליה מוסיפים שכבות של ציפוי אנטי-רפלקטיבי. על ידי שימוש במצע עם סימום נמוך, ניתן ליצור צומת מהצורה –מתכת- חומר אינטרינזי- חומר מסוג n אשר תהיה דומה בתכונות שלה לצומת p-i-n. למבנה זה יתרונות בעיקר עבור הארה עם פוטונים בעלי אנרגיה הגבוהה מרוחב הפס האסור. מבנה אחר לפוטו-דיודה כזאת מוצג באיור 9e. במקרה הזה שטח המגע מתכת-מל"מ הוא קטן מאוד מכונה point contact). כאן הנפח של ההתקן קטן מאוד וכתוצאה מכך זמן הסחיפה דרכו קטן מאוד גם כן וכן הקיבול שלו. מסיבות אלו התקן זה מתאים ביותר למודולציה בתדר גבוה.

בהתקנים לחישה של פוטונים בעלי אנרגיה הנמוכה מרוחב הפס האסור, מתקבלת יעילות גבוהה יותר כאשר מאירים אותם מצד המצע. מאחר וגובה מחסום הפוטנציאל נמוך מרוחב הפס האסור, פוטונים בעלי אנרגיה הגבוהה ממחסום הפוטנציאל אך נמוכה מרוחב הפס האסור לא יבלעו במצע ויבלעו בשכבת המתכת בסמוך לממשק עם המל"מ. על כן, כעת שכבת המתכת יכולה להיות עבה יותר מה שמאפשר שליטה טובה יותר על העובי שלה והקטנה של ההתנגדות הטורית שלה. בהתקנים מבוססי סייקון ניתן להשתמש בסיליסייד במקום במתכת. חומרים אלו בדרך כלל מאפשרים בניית צמתי מתכת מל"מ עם תכונות הדירות יותר שכן בתהליכי הייצור שלהם החומר נוצר על ידי ריאקציה של המתכת עם הסיליקון מה שלא דורש לחשוף פני שטח מחדש. בדרך כלל עושים שימוש ב PtSi , Pd_2Si ו- IrSi למטרות אלו. ייתרון נוסף שיש לפוטו-דיודות מסוג זה הוא שתהליך הייצור שלהם דורש טמפרטורות נמוכות מאלו הדרושות בתהליכי דיפוזיה והשתלת יונים בהם עושים שימוש כאשר יוצרים צמתיים בעזרת מזהמים.

פוטו-דיודות המבוססות על מגע מתכת- מל"מ הן שימושיות במיוחד בתחום האור הנראה והאולטרה סגול. בחלקים האלו של הספקטרום מקדם הבליעה של רוב המוליכים למחצב גבוה מאוד (בסדר גודל של 10^5 cm^{-1} , אשר מגדיר עומק בליעה של מאה ננומטר). ניתן לתכנן את סוג המתכת, העובי שלה, והציפוי האנטי סלקטיבי שמעליה בכדי שחלק גדול מהאנרגיה שמגיעה אל ההתקן תיבלע במל"מ בסמוך לממשק של המל"מ עם מתכת.

זרם החושך בדיודות מסוג זה הוא תוצר של פליטה תרמויונית של נשאי רוב על מעבר למחסום הפוטנציאל. מאחר והזרם הוא זרם של נשאי רוב, הוא לא מוגבל על ידי כמות הנשאים וזרמי דיפוזיה כמו בצמתי p-n. כתוצאה מכך התקנים אלו יכולים להיות מהירים יותר וכבר נעשו הדגמות של פוטו-דיודות מבוססות על מגעי שוטקי אשר עובדות בתדרים הגבוהים מ- 100 GHz . על כן, היתרונות



איור 11: מנגנוני המרה של פוטו-דיודה מבוססת מגע מתכת מל"מ. (a) פוטון בעל אנרגיה הגבוהה מרוחב הפס האסור יוצר זוג אלקטרון-חור. (b) בליעה של פוטון בעל אנרגיה הנמוכה מרוחב הפס האסור במתכת ואיסוף שלו בעזרת internal photoemission. (c) היעילות הקוואנטית כתלות באורך הגל בהתחשב בשני המנגנונים.

העיקריים של פוטו-דיודות אלו הם היכולת לפעולה מאוד מהירה וחישה של פוטונים בעלי אורכי גל שלא נבלעים במוליך למחצה.

רעש ודיטקטיביות

פוטו-מוליכים

חשוב מאוד כי הרעש המיוצר בחיישן יהיה כמה שיותר קטן שכן עוצמת הרעש מגדירה האות המינימלי שניתן לקלוט. מסיבה זו במקרים רבים אנו נדון ביחס אות לרעש שניתן לקבל מחיישן מסוים. ישנם מספר רב של גורמים אשר תורמים לרעש. זרם החושך הוא הזרם אשר עובר בהתקן כאשר הוא נמצא תחת מתח אבל לא מואר. בכל טמפרטורה השונה מ-0 תהיה גנרציה ורקמובינציה תרמית של נשאי מטען. הרעש כתוצאה ממעברים אלו נקרא רעש Johnson. מקור אחר לרעש הוא קרינה מהסביבה, לדוגמה, קרינת גוף שחור מהמארז של ההתקן (במידה הוא לא מקורר). רעש מסוג Shot noise הוא תולדה של העובדה שאירועי הבליעה ומעבר האנרגיה הם דיסקרטיים ועל כן הם ייצרו תנודות בזמן. רעש מסוג זה הוא משמעותי כאשר עוצמת האור היא נמוכה. רעש המכונה $1/f$ (הוא התדר) הוא רעש הנגרם על ידי מלכודות מטען בפני השטח. כפי שהשם מרמז, הוא משמעותי יותר בתדרים נמוכים.

מאחר וכל גורמי הרעש בלתי תלויים אחד בשני, ניתן לסכום אותם יחד לכדי גורם אחד. גודל אחד המגדיר את הרעש הוא ה- noise equivalent power (NEP). גודל זה הוא עוצמת האות (ב-RMS) אשר דרושה בשביל לקבל יחס אות לרעש של 1 ברוחב סרט של 1 Hz. בקירוב ראשון, ניתן לומר כי זוהי עוצמת האור המינימלית שניתן לגלות. הדיטקטיביות (detectivity) מוגדרת על ידי

$$D^* = \frac{\sqrt{AB}}{NEP} \left[\frac{cm \cdot Hz^{0.5}}{W} \right] \quad (37)$$

כאשר A היא שטח ההתקן ו- B היא רוחב הפס. הדיטקטיביות היא יחס האות לרעש כאשר וואט אחד של אור פוגע בהתקן בשטח של 1 סמ"ר. הפרמטרים האלו מנורמלים לפי שטח ההתקן מכיוון שבדרך כלל הרעש בהתקן הוא יחסי לשורש השטח. הדיטקטיביות תלויה ברגישות של ההתקן בתגובה הספקטרלית שלו וברעש. היא תשתנה עם אורך הגל הפוגע, תדר המודולציה של האות ורוחב הסרט של ההתקן ועל כן, כדאי לסמן אותה כ- $D^*(\lambda, f, B)$.

איור 12 מציג מעגל RF אקוויולנטי לפוטו-מוליך. המוליכות G כוללת את תרומת זרם החושך, הזרם הממוצע והזרם שהוא תוצר של הארת רקע. הרעש התרמי כתוצאה ממוליכות זו הוא:

$$\langle i_G^2 \rangle = 4kTGB \quad (38)$$

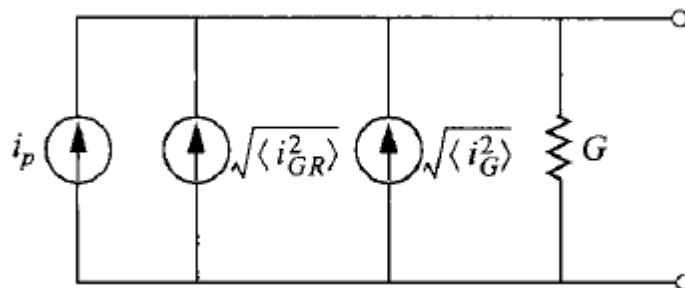
הרעש כתוצאה מגנרציה ורקמובינציה (shot noise) הוא:

$$\langle i_{GR}^2 \rangle = \frac{4qI_p G_a B}{1 + \omega^2 \tau_n^2} \quad (39)$$

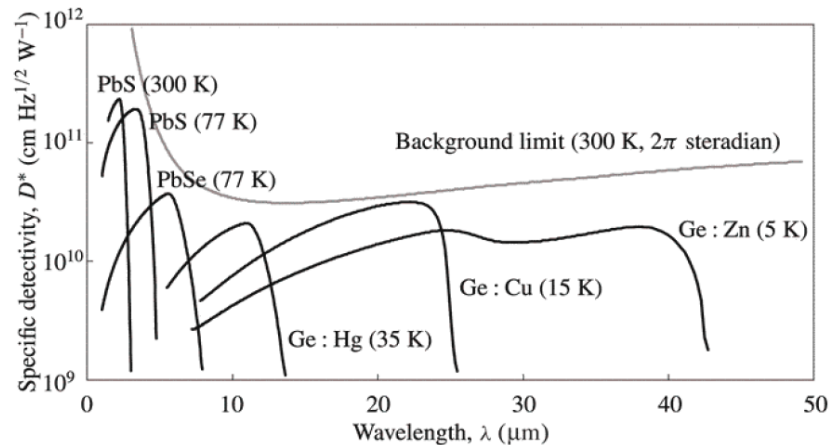
כאשר I_p הוא הפוטו-זרם במצב מתמיד. מתוך משוואת (15) - (39) נמצא את היחס אות לרעש:

$$\left. \frac{S}{N} \right|_{power} = \frac{i_p^2}{\langle i_{GR}^2 \rangle + \langle i_G^2 \rangle} = \frac{\eta m^2 P_{opt}}{8Bh\nu} \left[1 + \frac{kT}{qG_a} (1 + \omega^2 \tau_n^2) \frac{G}{I_p} \right]^{-1} \quad (40)$$

ואת ה- NEP נקבל על ידי בחירה של רוחב פס ויחס אות לרעש של 1 וחילוף הספק האור הפוגע.



איור 12: מעגל RF אקוויולנטי לפוטו-מוליך



איור 13: ערכי דיטקטיביות של פוטו מוליכים מחומרים שונים כתלות באורך הגל של האור. העקומה האפורה מסמנת את הדיטקטיביות של פוטו-מוליך אידיאלי עם יעילות קוואנטית של 1 אשר מוגבלת על ידי קרינת רקע של סביבה בטמפרטורה של 300K.

פוטו-מוליכים הם אטרקטיבים בגלל המבנה הפשוט שלהם, מחיר נמוך והרובסטיות שלהם. שימוש במוליכים למחצה מסוממים מאפשר להאריך את תחום הפעולה שלהם גם לאורכי גל ארוכים מבלי להידרש לחומרים עם פער אנרגיה קטן. מסיבה זו, במקרים רבים נעשה בהם שימוש לגלאים ב-IR. איור 13 מציג את ערכי הדיטקטיביות של פוטו-מוליכים מחומרים שונים כתלות באורך הגל של האור הפוגע בהתקן. העקומה האפורה מסמנת את הדיטקטיביות של פוטו-מוליך אידיאלי בעל יעילות קוואנטית של 1 בהנחה שהוא נמצא בסביבה בטמפרטורה של 300K. עבור חיסה בתחום ה- mid-IR וה- far-IR, ההתקנים מקוררים לטמפרטורות נמוכות (לדוגמה 77K, או 4.2K). הטמפרטורות הנמוכות מקטינות תהליכי יוניזציה, מרוקנות את רמות האנרגיה מנשאי מטען, ועל ידי כך מגדילות את ההגבר ואת יעילות החיסה. באורך גל של כחצי מיקרון לפוטו-מוליך עשוי CdS יש רגישות גבוהה. עבור חיסה של קרינה באורך גל של 10 מיקרון נעדיף HgCdTe. לחיישנים בתחום המיקרוגל ובעוצמות נמוכות אנו נעדיף פוטו-דיודות שכן הן מאפשרות מהירות תגובה גבוהה יותר ויחס אות לרעש גבוה יותר. מאחר ופוטו-מוליכים מוגבלים במהירות שלהם, נעשה בהם שימוש בעיקר כחיישנים ל-IR, במיוחד עבור אורכי גל הגבוהים מכמה מיקרונים.

פוטו-דיודות

על מנת לנתח את הרעש בפוטו-דיודות נתייחס לתהליך החיסה על פי דיאגרמת הבלוקים המתוארת באיור 14a. אות אופטי יחד עם הארת רקע נבלעים בפוטו-דיודה, בתהליך שיוצר זוגות אלקטרון חור. האלקטרונים והחורים מופרדים על ידי השדה החשמלי של הצומת ועוברים סחיפה בכיוונים הפוכים. כתוצאה מכך, נוצר זרם העובר גם בנגד העומס. מאחר ורעש הוא תלוי תדר, ננתח את התגובה לאות כמתואר במשוואה (14). הזרם הממוצע כתוצאה מאות כניסה זה נתון על ידי משוואה (9). ה-RMS של האות האופטי הוא $mP_{opt}/\sqrt{2}$ וזרם ה-RMS שהדיודה מייצרת הוא על פי משוואה (15) כאשר ההגבר הוא 1.

נסמן את הפוטו-זרם הנוצר כתוצאה מהארת הרקע I_B ואת זרם החושך כתוצאה מגרנרציה תרמית של זוגות אלקטרון חור בתוך אזור המיחסור I_D . בגלל האופי הרנדומלי של כל הזרמים האלו. התרומה שלהם ל-shot-noise נתונה על ידי הסכום שלהם:

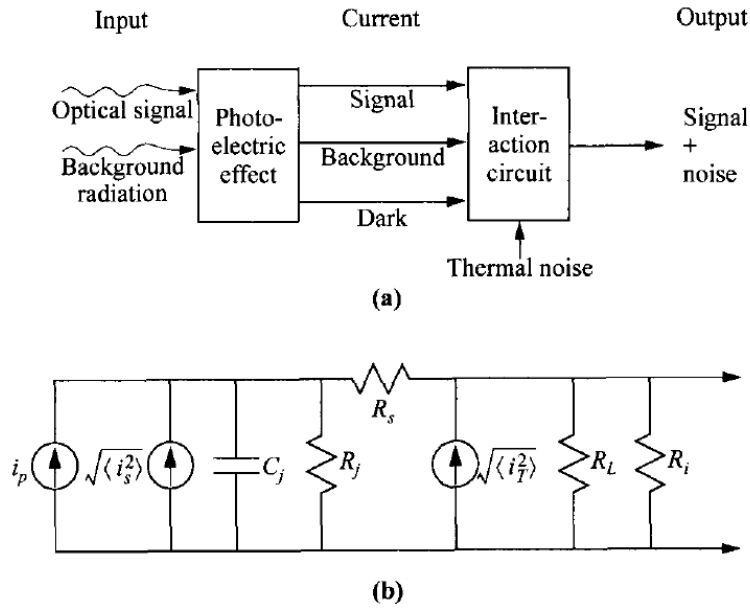
$$\langle I_S^2 \rangle = 2q(I_P + I_B + I_D)B \quad (41)$$

I_P הוא הזרם הממוצע הנוצר על ידי האות האופטי כפי שמתואר במשוואה (9). הרעש התרמי (Johnson) ניתן על ידי:

$$\langle I_T^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_{eq}} \quad (42)$$

כאשר:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_i} \quad (43)$$



איור 14: דיאגרמת בלוקים של תהליך חישת אור (א), והמעגל השקול לפוטו-דיודה (ב).

ו- R_j הוא התנגדות הצומת, R_i הוא התנגדות הכניסה של המגבר אליו הפוטו-דיודה מחוברת, ו- R_L הוא התנגדות העומס. איור 14b מציג מעגל שקול לפוטו-דיודה, הקבל C_j מסמן את קיבול הצומת. כל ההתנגדויות המוצגות תורמות רעש תרמי למערכת. במקרים רבים ההתנגדות הטורית R_s היא קטנה וניתן להזניח אותה.

עבור אות כניסה עם $m=1$ והספק ממוצע P_{opt} , יחס האות לרעש הוא:

$$\left. \frac{S}{N} \right|_{power} = \frac{i_p^2}{\langle i_s^2 \rangle + \langle i_T^2 \rangle} = \frac{0.5 \left(\frac{q\eta P_{opt}}{h\nu} \right)^2}{2q(I_p + I_B + I_D)B + \frac{4kTB}{R_{eq}}} \quad (44)$$

אנו מעוניינים למצוא את האות האופטי המינימלי שיאפשר יחס אות לרעש נתון. עבור אותות חלשים מספיק, ניתן להניח כי מקורות הרעש I_B ו- I_D יהיו גדולים בהרבה מ- I_p ולכן:

$$P_{opt}|_{min} = 2 \frac{h\nu}{\eta} \sqrt{\frac{\left(\frac{S}{N} \right) I_{eq} B}{q}} \quad (45)$$

כאשר $I_{eq} = I_B + I_D + \frac{2kTB}{qR_{eq}}$. ה- NEP מתקבל על ידי הצבה של יחס אות לרעש של 1, ורוחב סרט של

1 כאשר ההספק האופטי הוא ב- RMS:

$$NEP = \frac{h\nu}{\eta} \sqrt{2 \frac{I_{eq}}{q}} \quad (46)$$

מכאן אנו רואים שעל מנת להגדיל את הרגישות של פוטו-דיודות יהיה עלינו להגדיל גם את היעילות הקוואנטית, ואת R_{eq} תוך הקטנה של זרמי החושך והארת הרקע.

סיכום

בהרצאה זו עסקנו בשני התקנים אופטו-אלקטרוניים, פוטו-מוליך ופוטו-דיודה. ראינו כי בשני ההתקנים אות אופטי מומר לזרם חשמלי באמצעות העברת האנרגיה של הפוטון לנשאי מטען ואז הולכה של נשאי המטען בתוך ההתקן. ניתחנו את המנגנונים אשר מגדירים את היעילות הקוואנטית של התהליך-היחס בין מספר הפוטונים אשר פוגעים בהתקן וזרם האלקטרונים שהם יוצרים בו. בחנו את תגובת התדר של כל אחד מההתקנים וראינו כיצד בהתקנים אלו יש צורך בפשרה בין מהירות התגובה של

ההתקן ורוחב הסרט שלו, והיעילות הקוונטית שלו, אשר משפיעה באופן ישיר על הרגישות. לאחר מכן ניתחנו שני גורמים לרעש- האופי הבדיד של פוטו-גנרציה ורקומבינציה, ורעש תרמי. הראנו כי עוצמת הרעש תגדיר את היכולת של התקנים לחוש אותות בעוצמות נמוכות.