



תכנון APD משופר מאפשר גלאים יעילים יותר למניית פוטונים יחידים

אות מוצא בצורת פולס חשמלי. דבר זה דורש לחבר ל-PMT מתח גבוה של כ-1 עד 3 קילו-וולט. התכנון הסכימתי של מכפילור מוצג באיור 2.

אפשר להשתמש ב-PMT במוד Geiger כדי לגלות פוטונים יחידים, אולם הזרם הפנימי הגבוה מאוד הנוצר דורש שההתקן יאופס חשמלית לאחר כל אירוע פוטוני, דבר היוצר זמן מת במהלכו לא ניתן לגלות פוטונים נוספים. בעוד שניתן להשתמש בחומרי קתודה שונים בעלי מאפיינים ספקטראליים שונים בהתאם לתחום רוחב-הפס שיש לגלות, מכפילורי ריק רגילים מציגים את הרגישות הטובה ביותר באורך-הגל הקצר יותר של תחומי הכחול והאולטרא-סגול. PMTs כוללים לרוב אזורים פעילים גדולים יחסית (בקוטר של מ"מ אחדים), אך יש להם לעתים קרובות רמות רעש חשוד גבוהות והם חשופים לפולסים מאוחרים (afterpulsing), תופעה שבה פולס מוצא אקראי נפלס למרות שלא התגלה כל פוטון.

מכפילורים במצב מוצק

לאחרונה פותחו גם APDs מסיליקון מבוססי-CMOS מרובי-פיקסלים במוד Geiger, המכונים לעתים קרובות מכפילורי סיליקון. טכנולוגיה זו נראית

וראים ש-1 וואט ב-405 ננו-מטר מתאים בערך ל-2000 פוטונים בשנייה, בעוד קצב מניות של 100 פוטונים בשנייה ב-670 ננו-מטר מתאים לרמת הספק של 30aW בלבד (ראה איור 1).

בעוד הדרישות הספציפיות של היישומים המוזכרים לעיל עשויות להיות שונות בהרבה, יש להם דבר משותף אחד: הצורך בגלאי פוטונים יחידים יעיל ביותר, בעל רעש נמוך. מספר טכנולוגיות המתאימות למניית פוטונים מוזכרות להלן.

מכפילורים (photomultipliers)

המכפילור (PMT) הרגיל הוא גרסה מיוחדת של שפופרת ריק הממירה פוטון פוגע לאות חשמלי המוגבר בצורה פנימית על-ידי מה שמכונה מכפיל אלקטרוני. הפוטון פוגע בחומר הפוטו-קתודה, ויוצר אלקטרון ממוקד לאחר מכן אל מכפיל האלקטרוני, הבנוי מסדרת אלקטרודות משניות הידועות כדינודות, כאשר כל אחת מהן פולטת אלקטרוני נוספים לאחר בליעה של אלקטרוני פוגעים, ומייצרת על-ידי כך תופעת מפולת (avalanche) דרך ההתקן. הדינודות נשמרות בפוטנציאל חשמלי מסוים, העולה מדינודה לדינודה כדי להאיץ את האלקטרוני דרך המכפילור אל האנודה, שם הם נבלעים, ויוצרים בכך

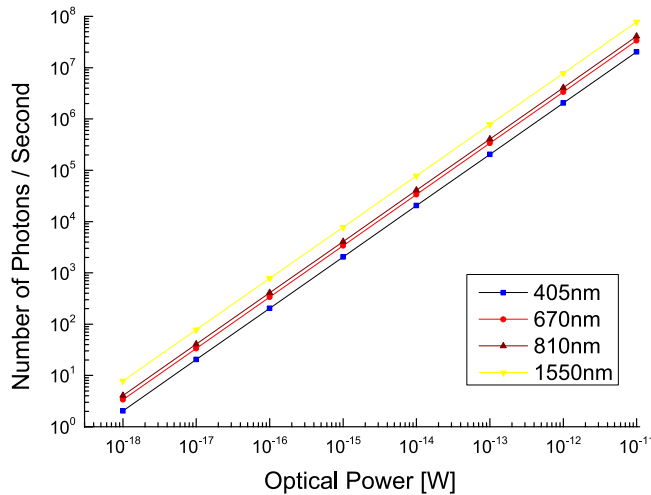
Dr. Mike Hodges, Stephanie Grabher, LASER COMPONENTS

לפני 25 שנה מעטים מאיתנו היו מנבאים את חשיבות מניית פוטונים יחידים במאה ה-21. כיום מדענים ומהנדסים סומכים בטבעיות על טכניקה זו כאשר דרוש גילוי של אותות אור חלשים ביותר וגלאים רגילים אינם מסוגלים להבחין בין אותות רעש. ניתן למצוא מניית פוטונים בתחומים שונים של תעשייה, מחקר וטכנולוגיית תקשורת, עם יישומים מיוחדים הכוללים קריפטוגרפיה קוונטית, ספקטרוסקופיה, LIDAR אסטרונומי, מיקרוסקופיה פלואורסנטית, סיווג חלקיקים תעשייתיים, חשיפת סמים, ניתוח DNA, גילוי פרודות יחידות ועוד. אם מסתכלים על חוזה האותות שיש לגלות במקרים כאלה מתברר מדוע התהליך מכונה גילוי פוטון יחיד. מספר הפוטונים בשנייה התואם רמת הספק אופטי מסוימת ניתן לבטא כ:

$$N(t) = 3.03 \cdot 10^{16} \cdot \lambda \cdot P$$

כאשר P הוא ההספק האופטי בואטים ו-λ אורך הגל בננו-מטר. כך לדוגמה, אנחנו

איור 1. הקשר התלוי באורך הגל בין הספק ומספר הפוטונים הפוגעים



במוד-Geiger מקורר בצורה תרמו-חשמלית עם מעגל הדברה אקטיבי מיוטב בגורם צורה קומפקטי המאפשר למשתמש להשיג את הביצועים המיוטבים מה-SPAD. איור 4 מראה דיאגרמה מלבנית של מודול COUNT[®] על-ידי רכיבי לייזר עם מחבר סיב.

יעילות גילוי: המפתח לביצועים

ניתן להשתמש בגורמי איכות אחדים כאשר משווים את התאמת הגלאים למניית פוטונים. רעש חשוך, סבירות של פולסים מאוחרים וזמן מת הם כולם חשובים, אולם עבור רוב היישומים יעילות הגילוי היא המכרעת. מסיבה זו SPADs נחשבים לרוב עדיפים על PMTs בשל יעילות הקוונטית (quantum efficiency - QE) הגבוהה מאוד שלהם לאורך תחום ספקטראלי רחב מבערך

למעגלים כאלה יש זמן התאוששות ארוך המגביל את קצב המנייה המרבי היעיל (1). מסיבה זו, רוב מודולי ה-SPAD הזמינים מסחרית כוללים מעגלי הדברה אקטיביים המגלים את קיום המפולת ומפחיתים לאחר מכן את המשוב של ה-APD לערך מתחת ל- V_{br} תוך ננו-שניות מעטות. התוצאה היא זמן מת קצר יחסית, לרוב מסביב ל-50 ננו-שניות, כאשר לאחר מכן מתח המשוב מוחזר לערכו הקודם, המאפשר לאירוע הפוטוני הבא להיקלט. בדרך זו, ניתנים להשגה בנקל קצבי מנייה מרביים של 10 מגה-הרץ ומעל זה. מודולי ה-SPAD הטובים ביותר הזמינים כעת מציגים קצבי מנייה חשוכה של פחות מ-10, המתאימים לתחום דינמי מעל 10⁶. מודולי SPAD מסחריים משלבים APD

מבטיחה ובעלת יתרונות כגון עלויות ייצור נמוכות יחסית בשל טכניקות ה-CMOS המקובלות, מתחי ההפעלה הנמוכים, התכנון הקומפקטי עם תחום פעיל כולל גדול ורזולוציית תזמון טובה. נכון להיום, אולם, רעש חשוך, שהוא גבוה יותר בסדרי גודל מאשר ב-SPADs (Single Photon Avalanche Diodes) רגילים במוד-Geiger, והיעילות הקוונטית הנמוכה באורכי-גל ארוכים יותר פירושים שהתקנים אלה נשארים פחותים באיכותם לעומת SPADs בעלי אלמנט יחיד עבור רוב יישומי המנייה של פוטונים יחידים.

פוטו-דיודות מפולת (APD) הן פוטו-דיודות בעלות רגישות גבוהה בעלות זמני היענות מהירים מאוד. שלא כמו דיודות PIN רגילות, ה-APD משתמש בשבב פנימי לשם יצירת מפולת של זוגות אלקטרון-חור על-ידי יינון באימפקט. דרישה מוקדמת לכך היא מתח משוב די גבוה לשם הרחבת אזור הבליעה של ה-APD כדי לאפשר יצירה של יינון אלקטרון-חור מספיק (ראה איור 3).

כאשר מופעלת מתחת למתח הפריצה, המפולת תכבה את עצמה בשל הפסדי החיכוך בתוך המוליך למחצה. APDs בנויים במיוחד יכולים לשמש גם במוד Geiger, שם מתח המשוב נקבע מעל מתח הפריצה של ה-APD, דבר המאפשר למפולת להישמר ולהשיג שבב פנימי של עד 108. APDs מסוג זה מכונים לרוב דיודות מפולת לפוטון יחיד (single photon SPAD - avalanche diodes).

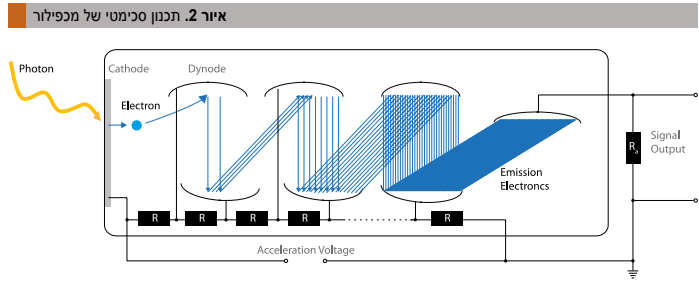
פעולה במוד Geiger בשבב כה גבוה מובילה ללא יוצא מן הכלל לרמות זרם מאוד גבוהות בתוך ה-SPAD, עליהן יש לשלוט תוך שימוש במעגל הדברה (quenching) מתאים כדי למנוע נזק להתקן. בצורתו הפשוטה ביותר, מעגל ההדברה יכול להתבסס על נגד מגביל-זרם המורכב בטור עם ה-APD, אשר ידביר את המפולת אם ערך הנגד הוא מספיק גדול. אולם,

טבלה 1. יעילות הגילוי וקצב מניית החושך בקשר למתח הפעולה עבור VLoK APD (LASER COMPONENTS)

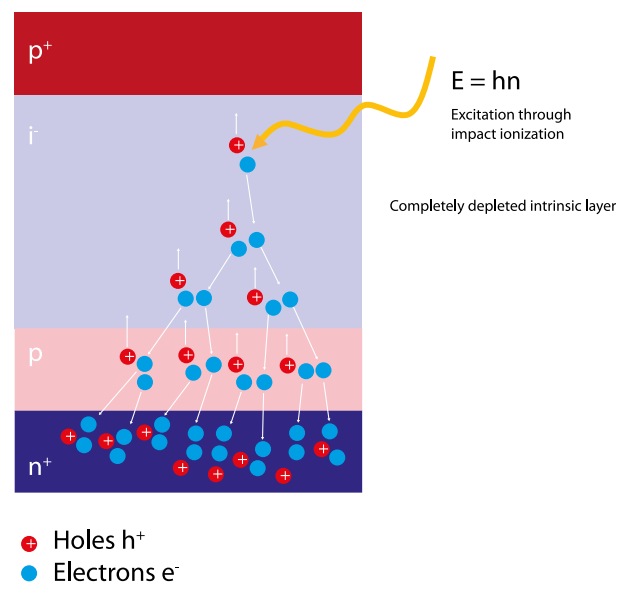
Operating Voltage [V]	Overvoltage [V _{br} -V _{op}]	F _{405nm} [%]	F _{670nm} [%]	F _{810nm} [%]	Dark count rate [Hz]	Afterspiking [%]	Dead time [ns]
346.3	2.0	38	65	32	15.4	0.06	61
348.4	4.1	36	68	42	21.4	0.11	66
350.6	6.3	48	79	55	57.4	0.26	91
352.7	8.5	43	85	55	91.4	0.42	90
355.0	10.7	48	90	60	138.2	0.89	49



דוגמאות של מודולי SPAD: סדרת COUNT[®] של מוני פוטונים של LASER COMPONENTS, גרסת האדום והכחול-המחוזק, המוצגים בתצורת חיבור סיב



איור 3. עקרון הפעולה של פוטו-דיודת מפולת. פוטון פוגע יוצר זוג אלקטרון-חור. האלקטרון, המואץ באזור השבח, יוצר זוגות אלקטרון-חור נוספים דרך יינון באימפקט ונוצרת תופעת מפולת.



גם מחברי סיב אופטיקליים שניתן לייטבם עבור תחומי אורך-גל מיוחדים לפי דרישה. אם כי מרבית מאמץ פיתוח ה-SPAD נכון להיום מוקד על התקנים מבוססי-סיליקון, עניין גובר במניית פוטונים יחידים באורכי-גל ארוכים יותר יצר הופעה של APDs ב-InGaAs במוד Geiger. את אלה ניתן להפעיל בעיילות גילוי של עד 20% או יותר, אם כי עם קצבי מנייה חשוכה גבוהים יותר משמעותית מאשר פריטי הסיליקון המקבילים. התפתחות ניזונה בעיקר מההתקדמות בטכניקות של קריפטוגרפיה קוונטית, שם חיוניות ההעברה של נתונים למרחקים ארוכים דרך סיבים אופטיים; כאן היעילות הגבוהה של גלאי הסיליקון מתבטלת נוכח הפסדי ההעברה הגבוהים

הסדרה **COUNT[®]** הכחולה של **LASER COMPONENTS**, אשר פותחה בשנת 2011 המוקדמת והמבוססת על גרסה מחוזקת-אולטרא-סגול של ה-**APD VLok**. ה-**COUNT[®]** הכחול מראה יעילות גילוי טיפוסית של 55% ב-405 ננו-מטר ו-70% ב-532 ננו-מטר. גלאים משופרים קיימים גם עבור תחום הקרוב לאינפרא-אדום, לדוגמה ה-**COUNT[®] NIR** של **LASER COMPONENTS** אשר פותח במיוחד עבור יישומים באופטיקה קוונטית ומידע קוונטי. הוא מראה יעילות גילוי מעל-הממוצע של 60% טיפוסית ב-810 ננו-מטר (ראה איור 5). יתרונות נוספים של מודולי ה-**SPAD** כוללים פעולה ישירה עם הספקת מתח DC נמוך (לרוב +5 או +12 וולט) כמו

300 ננו-מטר עד הקרוב לאינפרא-אדום. לרוב, רגישות של מודול מניית פוטונים תתבטא על-ידי היעילות הקוונטית, כאשר היחס של האלקטרונים המופקים לפוטונים הנבלעים מבוטא כערך באחוזים. יצרנים של התקנים אחדים מעדיפים להגדיר היענות (באמפרים/ואט) הקשורה ל-QE על-ידי:

$$QE = \frac{R_0 - 1240}{\lambda} - 100\%$$

כאשר R_0 היא ההיענות ב-A/W ו- λ אורך הגל בננו-מטר. כאשר משווים התקנים בעלי ביצועי רעש והסתברות לפולסים מאוחרים דומים, הגלאי בעל ה-QE הגבוה ביותר יהיה המתאים ביותר עבור מניית פוטונים. יש לציין שה-QE הוא ביטוי של יעילות ה-**APD** בלבד, כאשר במודול **SPAD** גורמים אחרים כגון האלקטרוניקה יכולים גם להשפיע במעט על הביצועים הכוללים. מסיבה זו, דפי נתונים של מודולי **SPAD** מציינים בהרבה מקרים יעילות גילוי הפוטונים (Pd) או הסתברות, שהיא ההסתברות באחוזים שפוטון פוגע ייצור פולס חשמלי במוצא המודול.

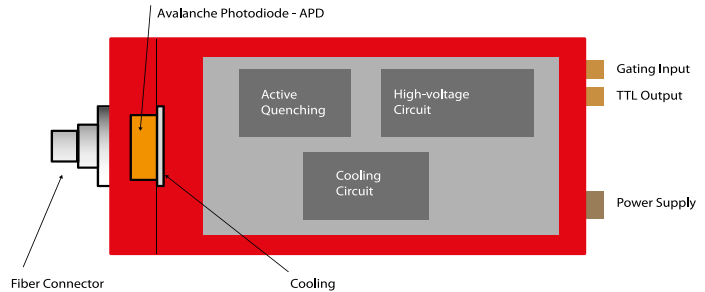
כאשר מתכננים **SPAD**, חשוב לזכור שהן יעילות הגילוי והן קצב המנייה החשוכה תלוים במתח המשוב המוון ל-**APD**. כפי שנאמר לעיל, ה-**APD** מופעל במוד Geiger מעל מתח הפריצה ($V_{op} > V_{br}$), כאשר ההפרש בין ה- V_{op} וה- V_{br} ידוע כמתח-יתר (overvoltage), אשר ניתן לכוון כדי לייטב פרמטר מסוים כמתואר בטבלה 1. אולם, ייטוב כזה יכול להצליח רק אם תכנון ה-**APD** הנדון הוא בעל איכות מספיק גבוהה, דבר המחייב מבנה של **APD** המתוכנן ליעילות קוונטית מרבית תוך שמירה על גורם ה-**K** (2) (היחס בין תכונות היינון של החור והאלקטרון) למינימום כדי להקטין את הרעש. ה-**APD VLok** של **LASER COMPONENTS** תוכנן במיוחד לצורכי מניית פוטונים ומאפשר למודולי **SPAD** ביצועים ללא תקדים דוגמת קצבי מניית חושך של $< 10c/s$ עם יעילויות גילוי $< 80\%$ ב-670 ננו-מטר.

בעוד ה-**SPADs** היו בעבר ההתקן הנבחר עבור מניית פוטונים בתחומי האדום והקרוב-לאינפרא-אדום, **PMTs** שלטו בתחום הכחול והאולטרא-סגול בשל ה-QE הטוב יותר שלהם באורכי-גל קצרים יותר. אולם, פיתוחי **SPAD** אחרונים פירושו שה-**SPADs** של היום ניתנים לשימוש בעיילות מאולטרא-סגול ועד לקרוב לאינפרא-אדום. דוגמה טובה היא

איור 5. מודולים COUNT[®] NIR ו-COUNT[®] Q SPAD



איור 4. דיאגרמה מלבנית של מודול COUNT[®] של LASER COMPONENTS



סימוכין

- [1] Stipcevic M., Skenderovic H. Gracin D. Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range, Optics Express 18(2010)17448-17459
- [2] Webb, P.P. et al, Properties of Avalanche Photodiodes, RCA Review. Vol. 35, pp. 234-278. June 1974

הכתבה נמסרה באדיבות להט טכנולוגיות נציגה של Laser component בישראל

בהתאם למשימה השוטפת.

סיכום

המספר העולה של יישומים היוצרים פוטונים יחידים בתחום אורכי-הגל המלא מאולטרא-סגול עד קרוב לאינפרא-אדום מעלה גם דרישות גבוהות יותר מהגלאים שצריכים לגלות פוטונים יחידים אלה. בעתיד, המגמה תהיה לשלב את יתרונות של טכנולוגיית CMOS הלא-יקרה עם ה-SPAD היעיל ובעל הרעש הנמוך.

של הסיב באורכי-גל קצרים יותר, בעוד העברת הסיב הטובה יותר ב-1550 ננו-מטר יותר מאשר מפצה עבור ה-QE הנמוך יותר של גלאי ה-InGaAs.

המודול COUNT[®] Q החדש של LASER COMPONENTS (ראה איור 5) פותח במיוחד עבור יישומים כאלה והוא מציג QE מתכוונן (עד 20%, שכבר תוקן עבור קצב מנייה חשוך ופולסים מאוחרים) וזמן מת משתנה, המאפשר ללקוח לכוון את הגלאי