

شبیه‌سازی آشکارساز نوری بهمنی با استفاده از مدل مداری

محمد سروش

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

چکیده

مهمترین قسمت گیرنده نوری، بخش آشکارسازی اطلاعات است. بین انواع آشکارسازها، آشکارساز نوری بهمنی (APD) به دلیل داشتن بهره جریان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ساختارهای SAM-APD، برای آشکارسازی طول موج‌های بلند و کاهش جریان تونلی و ولتاژ بایاس، نواحی جذب فوتون و تکثیر حامل از هم جدا می‌شوند. با توجه به سازوکارهای پیچیده جذب فوتون و تکثیر حامل بر اثر شکست بهمنی، تحلیل و پیش‌بینی رفتار APD نسبتاً مشکل است.

در این مقاله با لحاظ کردن برخی فرضیات ساده‌کننده، بر اساس سازوکارهای داخل افزاره معادلات نرخ حامل در نواحی مختلف آشکارساز را تعیین می‌کنیم. با تبدیل این معادلات ریاضی به روابط مداری متناظر آن، یک مدار معادل برای SAM-APD به دست می‌آید. با مدل ارائه شده، بهره، بازده کوانتومی و جریان تاریک افزاره بررسی شده، نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی مقایسه می‌شود. مطابقت خوب این مدل با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که این مدل قادر است به‌ازای تغییر پارامترهایی مثل ولتاژ بایاس، ابعاد نواحی، نوع مواد بکاررفته و طول موج نور، رفتار آشکارساز را با تقریب قابل قبولی پیش‌بینی کند.

کلید واژه‌ها: آشکارساز نوری بهمنی، جذب فوتون، شکست بهمنی، مدار معادل.

Abstract

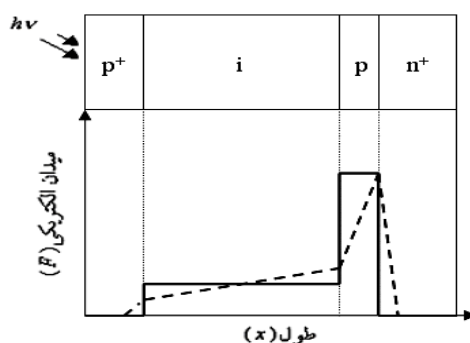
Using some simplifying assumptions in a separate absorption and multiplication avalanche photodiode (SAM-APD), in this paper we develop a circuit model. Then, using this circuit model, we calculate the gain and the quantum efficiency of the device. To examine the accuracy of the model, we compare the results obtained from the model with the experimental results. A fairly good correspondence between the model and the experimental results, shows that this model is capable of predicting the device behavior, while varying different parameters such as applied bias, device size, materials used to fabricate a device and hence the light wavelength.

Keywords: Avalanche Photodiode (APD), Avalanche Breakdown, Circuit Model, Photon Absorption

۱- مقدمه

امروزه آشکارساز نوری بهمنی^۱ (APD) در اکثر سیستم‌های مخابرات نوری به کار می‌رود. وجود بهره در APD، مهمترین عاملی است که این افزاره را از سایر آشکارسازهای نوری مانند PIN و MSM^۲ متمایز می‌کند. از اوایل دهه ۱۹۸۰ کارهای مختلفی در زمینه ساخت و اندازه‌گیری پارامترهای APD انجام شده و با گسترش این فعالیت‌ها، ساختارهای جدیدتری مطرح شده است. از جمله، می‌توان به ساختارهای ابرشبکه‌ای [۱] و [۲] و همچنین آشکارساز نوری بهمنی با نواحی جذب و تکثیر مجزا^۳ (SAM-APD) اشاره کرد [۳]. در این ساختارهای نوین، نسبت به ساختار معمولی، نویز و جریان تاریک کم‌تر و بهره جریان و ولتاژ شکست در لبه پیوند بزرگتر است.

در مقاله حاضر، ارائه مدل مداری برای ساختار SAM-APD، انجام می‌پذیرد. شمای ساده‌ای از این ساختار و نمودار میدان الکتریکی نواحی مختلف آن (نمودار خط‌چین) در شکل ۱ نمایش داده شده است. برای سهولت در امر مدل‌سازی، در این مقاله، فرض شده است که ناحیه تهی ناحیه p (تکثیر) را به‌طور کامل دربرگیرد، و میدان الکتریکی در نواحی i (جذب) و p یکنواخت باشد. نمودار میدان مفروض به صورت خط ممتد در ذیل ساختار شکل ۱ نمایش داده شده است. در چنین ساختاری فوتون از طریق ناحیه p⁺ به آشکارساز وارد شده و در ناحیه ذاتی i جذب می‌شود. میدان الکتریکی، الکترون‌ها و حفره‌های تولیدشده (دراثر جذب نور) را به ترتیب به سمت نواحی p و p⁺ در دو طرف ناحیه جذب می‌راند. به دلیل وجود یک میدان الکتریکی قوی در ناحیه p، فرایند بهمن‌سازی در این ناحیه تشدید شده باعث تکثیر حامل‌ها در آنجا می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نواحی جذب فوتون و تکثیر حامل در این ساختار کاملاً از هم جدا است. جداسازی نواحی جذب و تکثیر سبب کاهش ولتاژ بایاس لازم و جریان تونلی می‌شود.



شکل ۱: شمای ساده‌ای از یک ساختار SAM-APD، همراه با نمودار میدان الکتریکی: (خط‌چین) میدان واقعی، (خط ممتد) میدان ساده شده یکنواخت، در نواحی مختلف.

۲- مدل مداری

در بایاس معکوس، معادلات آهنگ برای نواحی چهارگانه ساختار شکل ۱ عبارت است از [۴]:

$$\frac{dn_{p^+}}{dt} = N_{Gp} - \frac{n_{p^+}}{\tau_{nrp^+}} - \frac{I_n}{q} \quad (1)$$

که در آن n_{p^+} تعداد الکترون‌ها در ناحیه p^+ ، I_n جریان نفوذ الکترون‌ها از این ناحیه به ناحیه ذاتی و τ_{nrp^+} طول عمر الکترون در ناحیه p^+ است. در سمت راست معادله، عبارت اول (N_{Gp}) آهنگ تولید حامل‌ها، از طریق جذب فوتون و عبارت‌های دوم و سوم به ترتیب آهنگ ترکیب الکترون در ناحیه p^+ و آهنگ نفوذ الکترون‌ها از آن ناحیه را نمایش می‌دهد.

$$\frac{dn_i}{dt} = N_{Gi} - \frac{n_i}{\tau_{nri}} - \frac{n_i}{\tau_{nti}} + \frac{I_n}{q} \quad (2)$$

که n_i تعداد الکترون‌ها در ناحیه i ، و τ_{nri} و τ_{nti} به ترتیب طول عمر ترکیب و زمان عبور الکترون از ناحیه جذب است. در سمت راست معادله، عبارت اول (N_{Gi}) آهنگ تولید حامل‌ها، از طریق جذب فوتون و عبارت‌های دوم و سوم به ترتیب آهنگ ترکیب الکترون‌ها در ناحیه ذاتی و آهنگ سرازیر شدن الکترون‌های ناحیه ذاتی به ناحیه تکثیر را بیان می‌کند.

$$\frac{dp_m}{dt} = P_{Gm} - \frac{p_m}{\tau_{prm}} - \frac{p_m}{\tau_{pim}} + (\alpha v_{nm} + \beta v_{pm}) p_m + \frac{I_p}{q} \quad (3)$$

که I_p جریان نفوذ حفره‌ها از ناحیه p به ناحیه n^+ ، p_m تعداد زوج حامل‌های تکثیر شده، τ_{prm} و τ_{pim} به ترتیب طول عمر ترکیب حفره در ناحیه تکثیر و زمان عبور حفره از آن ناحیه، α و β به ترتیب آهنگ یونیزاسیون الکترون و حفره و v_{nm} و v_{pm} به ترتیب سرعت رانش الکترون و حفره در ناحیه تکثیرند [4]. در سمت راست معادله، عبارت اول (P_{Gm}) آهنگ تولید حامل‌ها از طریق جذب فوتون در ناحیه تکثیر، عبارت‌های دوم و سوم به ترتیب آهنگ ترکیب حفره در ناحیه تکثیر و آهنگ سرازیر شدن الکترون‌های ناحیه تکثیر به ناحیه n^+ ، عبارت چهارم آهنگ تولید حامل از طریق تکثیر در ناحیه p و عبارت پنجم آهنگ ورود حفره‌های نفوذ یافته از ناحیه n^+ به ناحیه تکثیر را بیان می‌کند.

$$\frac{dp_{n^+}}{dt} = P_{Gn} - \frac{p_{n^+}}{\tau_{prn^+}} - \frac{I_p}{q} \quad (4)$$

که p_{n^+} تعداد حفره‌های ناحیه n^+ و τ_{prn^+} طول عمر ترکیب حفره در ناحیه n^+ است. در سمت راست معادله، عبارت اول (P_{Gn})، آهنگ تولید حامل‌ها از طریق جذب فوتون در ناحیه n^+ ، عبارت‌های دوم و سوم به ترتیب آهنگ ترکیب حفره‌ها در ناحیه n^+ و آهنگ نفوذ حفره‌ها از ناحیه n^+ به ناحیه تکثیرند [4].

آهنگ تولید حامل‌ها، از طریق جذب فوتون در نواحی چهارگانه آشکارساز با روابط (5) تا (8) بیان می‌شود:

$$N_{Gp} = \frac{P_{in}(1-R)}{h\nu} [1 - e^{-\alpha_p w_p}] \quad (5)$$

$$N_{Gi} = \frac{P_{in}(1-R)}{h\nu} e^{-\alpha_p w_p} [1 - e^{-\alpha_i w_i}] \quad (6)$$

$$P_{Gm} = \frac{P_{in}(1-R)}{h\nu} e^{-\alpha_p w_p - \alpha_i w_i} [1 - e^{-\alpha_m w_m}] \quad (7)$$

$$P_{Gn} = \frac{P_{in}(1-R)}{h\nu} e^{-\alpha_p w_p - \alpha_i w_i - \alpha_m w_m} [1 - e^{-\alpha_n w_n}] \quad (8)$$

که $\alpha_n, \alpha_m, \alpha_i, \alpha_p$ ضرایب جذب فوتون به ترتیب در نواحی p^+, i (جذب)، p (تکثیر) و n^+, w_n و w_p عرض نواحی p^+ و n^+ ، $h\nu$ انرژی فوتون، P_{in} توان فوتون فرودی و R ضریب بازتاب از سطح آشکارساز است.

برای دستیابی به الگوی مدار معادل برای افزاره، ابتدا باید کمیت‌های فیزیکی را به کمیت‌های مداری تبدیل کنیم. بدین منظور، کمیت C_n را به عنوان یک خازن ثابت فرض کرده با تقسیم بار حامل‌های هر ناحیه بر این کمیت، کمیت پتانسیل معادل تعداد حامل‌ها در هر ناحیه به صورت ذیل به دست می‌آید:

$$V_1 \equiv \frac{qn_{p^+}}{C_{n^o}} \quad V_2 \equiv \frac{qn_i}{C_{n^o}} \quad V_3 \equiv \frac{qp_m}{C_{n^o}} \quad V_4 \equiv \frac{qp_{n^+}}{C_{n^o}} \quad (9)$$

متناظر با این پتانسیل‌ها برای نواحی چهارگانه به ترتیب مقاومت‌های معادل R_1 تا R_4 :

$$R_4 \equiv P_{in} / N_{Gn} \quad , R_3 \equiv P_{in} / N_{Gm} \quad , R_2 \equiv P_{in} / N_{Gi} \quad , R_1 \equiv P_{in} / N_{Gp} \quad (10)$$

متناظر با فرایند ترکیب حامل در این نواحی به ترتیب مقاومت‌های معادل R_p و R_m ، R_i ، R_n :

$$R_p \equiv \tau_{prn^+} / C_{n^o} \quad , R_m \equiv \tau_{prm} / C_{n^o} \quad , R_i \equiv \tau_{nri} / C_{n^o} \quad , R_n \equiv \tau_{nrp^+} / C_{n^o} \quad (11)$$

متناظر با فرایند عبور حامل از نواحی جذب و تکثیر به ترتیب مقاومت‌های معادل R_{tm} و R_{ti} :

$$R_{tm} \equiv \tau_{pmt} / C_{n^o} \quad , R_{ti} \equiv \tau_{nti} / C_{n^o} \quad (12)$$

و بالاخره متناظر با تکثیر حامل در ناحیه تکثیر، جریان I_m :

$$I_m \equiv C_{n^o} V_3 (\alpha v_{nm} + \beta v_{pm}) \quad (13)$$

را تعریف می‌کنیم.

I_p و I_n در روابط (۱) تا (۴) به صورت ذیل بیان می‌شوند:

$$I_n = \frac{V_1}{R_{nd}} + \beta_n P_{in} + I_{n0} \quad (14)$$

$$I_p = \frac{V_4}{R_{pd}} + \beta_p P_{in} + I_{p0} \quad (15)$$

که R_{pd} ، R_{nd} ، β_p ، β_n ، I_{p0} و I_{n0} در مرجع [۴] تعریف شده‌اند.

با استفاده از کمیت‌های معرفی شده در روابط (۹) تا (۱۳)، روابط (۱) تا (۴) را می‌توان به ترتیب به صورت روابط (۱۶) تا (۱۹) بازنویسی کرد:

$$\frac{P_{in}}{R_1} = C_{n^o} \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{R_n} + I_n \quad (16)$$

$$\frac{P_{in}}{R_2} + I_n = C_{n^o} \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{R_i} + \frac{V_2}{R_{ti}} \quad (17)$$

$$\frac{P_{in}}{R_3} + I_m + I_p = C_{n^o} \frac{dV_3}{dt} + \frac{V_3}{R_m} + \frac{V_3}{R_{tm}} \quad (18)$$

$$\frac{P_{in}}{R_4} = C_{n^o} \frac{dV_4}{dt} + \frac{V_4}{R_p} + I_p \quad (19)$$

جریان خروجی APD عبارتست از:

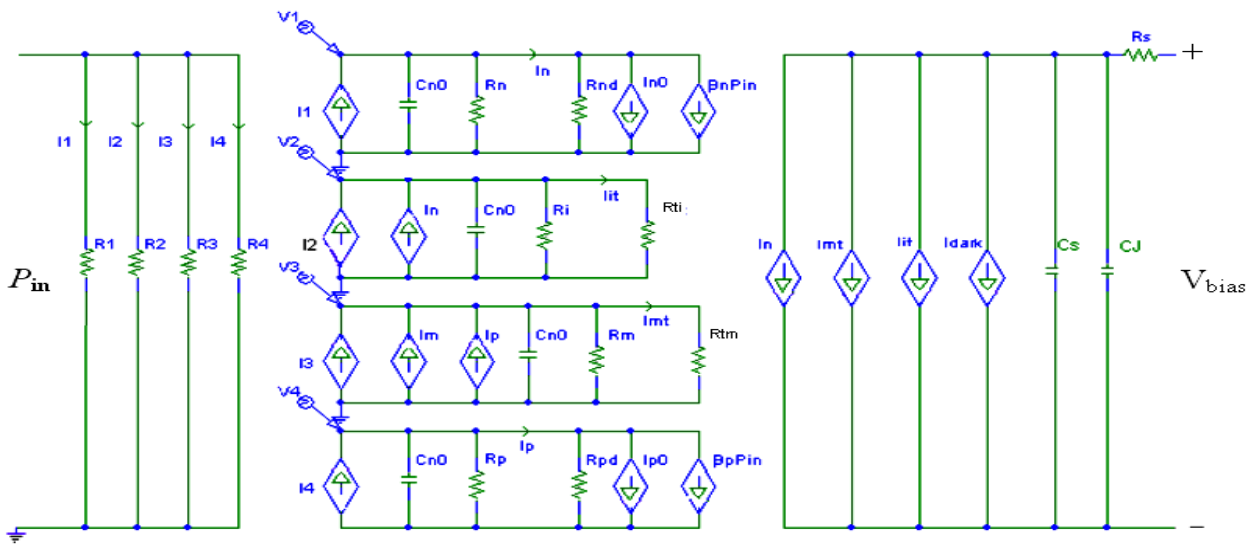
$$I_{out} = I_n + I_m + I_i + I_{dark} + (C_S + C_J) dV_{bias} / dt \quad (20)$$

C_S و C_J به ترتیب خازن پارازیتی و خازن پیوند، $I_{ti} \equiv V_2 / R_{ti}$ ، $I_{tm} \equiv V_3 / R_{tm}$ و I_{dark} جریان تاریک آشکار سازند:

$$I_{dark} = \frac{\Theta_1 A X^* V_J (X^* V_J + V_{bi})}{w_m} \exp\left(-\frac{\Theta_2 w_m}{X^* V_J + V_{bi}}\right) + \frac{V_J}{(X+1)R_d} \quad (21)$$

که در آن $\Theta_1 = \sqrt{2m_c q^3 / E_g} / h^2$ ، $\Theta_2 = 2\pi\gamma\sqrt{m_c E_g}^{3/2} / qh$ ، $X^* = X / (X+1)$ ، h ثابت پلانک، E_g شکاف انرژی ماده، m_c جرم موثر حامل و γ ضریبی ثابت است. X نسبت بیشترین مقدار میدان الکتریکی در پیوند pn^+ به میدان الکتریکی در ناحیه i است و به

غلظت نواحی i (N_i), p (N_A) و n^+ (N_D) بستگی دارد عبارت اول در رابطه (۲۱) جریان تونل زنی و عبارت دوم جریان نشستی پارازیتی را نشان می دهد. با استفاده از روابط فوق، مدار معادل یک SAM-APD به دست می آید. شکل ۲ این مدار معادل را نشان می دهد.



شکل ۲: مدار معادل SAM-APD

۴- نتایج شبیه سازی

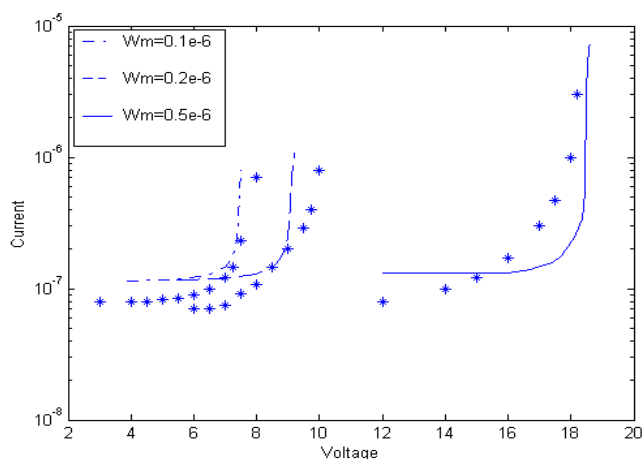
برای بررسی عملکرد مدار معادل پیشنهاد شده و مقایسه خروجی آن با مقادیر اندازه گیری شده، از پارامترهای یک SAM-APD نمونه استفاده شده است [۵] و [۶].

جریان خروجی (I_{out}) و جریان تاریک (I_{dark}) آشکارساز را برحسب ولتاژ بایاس، به ازای ۳ اندازه مختلف (w_{mi}) برای پهنای ناحیه تکثیر، شبیه سازی کرده ایم. نتایج حاصل به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. به منظور مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی، مقادیر برگرفته شده از مرجع [۵] با نماد '*' در این دو شکل نمایش داده شده است.

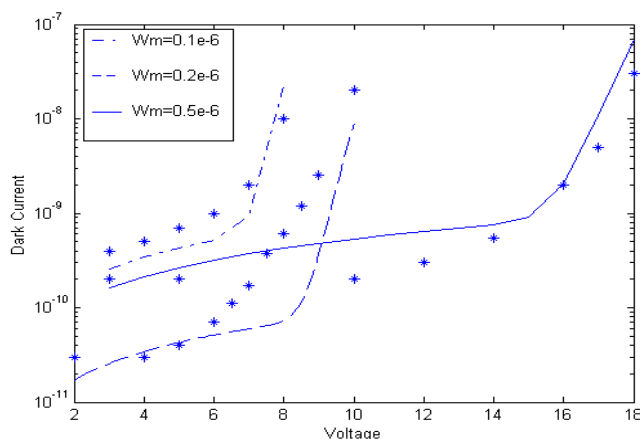
از شکل ۴ ملاحظه می شود که جریان خروجی آشکارساز به ازای یک بایاس معین، با افزایش پهنای ناحیه تکثیر کاهش می یابد. این پدیده را می توان به کاهش شدت میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر و کاهش یونیزاسیون برخورداری حامل ها نسبت داد.

توجه تغییرات جریان تاریک به ازای مقادیر مختلف پهنای ناحیه تکثیر پیچیده است. با افزایش عرض ناحیه تکثیر، شدت میدان الکتریکی در این ناحیه کاهش می یابد از طرفی جریان تاریک بدنه و جریان تاریک سطح زیاد می شود بنابراین تغییرات جریان تاریک مجموع اثرات فوق خواهد بود.

از بررسی هردو شکل ۳ و ۴ درمی یابیم که میان مقادیر خروجی حاصل از شبیه سازی مدار معادل پیشنهادی و مقادیر تجربی تطابق بسیار خوبی برقرار است. در واقع اختلاف موجود به خاطر فرض یکنواخت بودن میدان در نواحی جذب و تکثیر است.



شکل ۳: جریان خروجی آشکارساز (I_{out}) برحسب ولتاژ به ازای ۳ عرض مختلف ($w_m = 0.1, 0.2, 0.5 \mu m$) برای ناحیه تکثیر. نماد '*' نمایشگر داده‌های تجربی برگرفته شده از مرجع [۵] است.



شکل ۴: جریان تاریک آشکارساز برحسب ولتاژ به ازای ۳ عرض مختلف برای ناحیه تکثیر. نماد '*' نمایشگر داده‌های تجربی برگرفته شده از مرجع [۵] است.

نتیجه گیری

با فرض ساده‌سازی میدان الکتریکی در نواحی جذب و تکثیر و چشم‌پوشیدن از وجود میدان در دو ناحیه p^+ و n^+ در یک آشکارساز SAM-APD و براساس معادلات نرخ حامل، یک مدل مداری نسبتاً ساده بدست آورده‌ایم که مشخصات خروجی آشکارساز را با تقریب خوبی پیش‌بینی می‌کند. برای تأیید این امر، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی برگرفته شده از مراجع [۵] تا [۷] مقایسه شده است. این مدل مداری را می‌توان به عنوان مبنایی برای آنالیز نویز و حساسیت گیرنده قرار داد. همچنین می‌توان با پیش‌بینی بهره و نویز آشکارساز، تقویت کننده بعد از آشکارساز را طراحی کرد. از مزایای دیگر مدل مداری ارائه شده، امکان بررسی مشخصات خروجی آشکارساز با تغییر ابعاد و پارامترهای آن است. بنابراین مهندس طراح قادر خواهد بود قبل از ساخت افزاره، خروجی مورد نظرش را با تغییر ابعاد و پارامترها بهینه کند.

- [1] E. Gramsch, R. E. Avila, and J. Ferrer, "Development of a Novel Planar-Construction Avalanche Photodiode", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 48, pp. 211–217, 2001.
- [2] J. N. Haralson, and K. F. Brennan, "Novel Edge Suppression Technique for Planar Avalanche Photodiode," IEEE J. Quantum Electron., vol. 35, pp. 1863–1869, 1999.
- [3] H. Nie, K. A. Anselm, C. Lenox, and P. Yuan, "Resonant-Cavity Separate Absorption, Charge and Multiplication Avalanche Photodiodes with High Gain- Bandwidth Product", IEEE Photon. Technol. Lett, vol.10, pp. 409–411, 1998.
- [4] W. Chen, and Sh. Liu, "PIN Avalanche Photodiodes Model for Circuit Simulation", IEEE J. Quantum Electron., vol. 32, pp. 2105–2111, 1996.
- [5] K. A. Anselm, H. Nie, C. Hu, and C. Lenox, "Performance of Thin Separate Absorption, Charge, and Multiplication Avalanche Photodiodes", IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, pp. 482–490, 1998.
- [6] P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Device. Prentice-Hall, 1997.
- [7] H. Nie, C. Lenox, G. Kinsey, and A. L. Holmes, "Resonant Cavity InGaAs/ InAlAs Separate Absorption, Charge and Multiplication Avalanche Photodiode", Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials Devices, 1998, pp. 81–82.

¹ Avalanche Photodiode

² Metal Semiconductor Metal

³ Separate Absorption and Multiplication APD