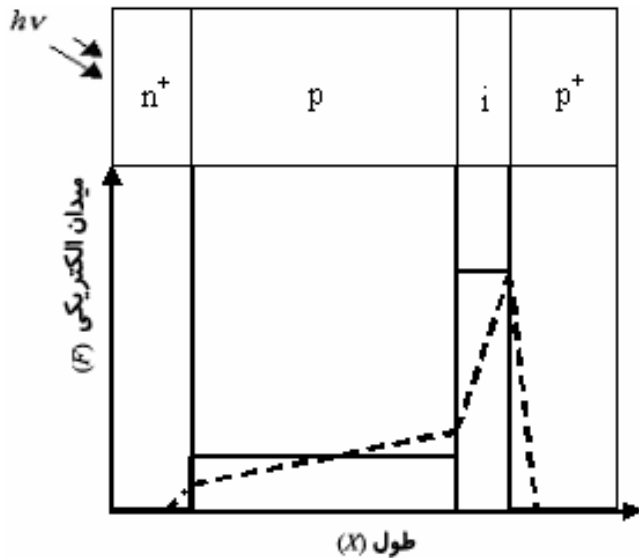


مدلسازی مدارى آشکارساز نوری بهمنی با نواحى جذب و تکثیر مجزا

محمد سروش، محمد کاظم مروج فرشى و عباس ظریفکار



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.

ساختار SAM-APD، که یکی از متداول‌ترین آشکارسازهای نوری است، مدار معادلی ارائه نشده است. در مقاله حاضر، برای ساختار SAM-APD، که شمای ساده‌ای از آن در شکل ۱ نمایش داده شده است، مدار معادلی ارائه می‌دهیم. نمودار قدر مطلق میدان الکتریکی در این ساختار به صورت خط چین در ذیل آن به نمایش گذاشته شده است. اما، برای سهولت در امر مدلسازی، در این مقاله، فرض شده است که ناحیه تهی، ناحیه p (تکثیر) را به‌طور کامل در برگیرد، و میدان الکتریکی در نواحی تکثیر و جذب (i) یکنواخت باشد. نمودار میدان مفروض به‌صورت 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 تولید شده (دراثر جذب نور) را به ترتیب به سمت نواحی p و p^+ در دو طرف ناحیه جذب می‌راند. به‌دلیل 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.

۲- مدل مدارى

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

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

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 ساز و کارهای 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 ساز و کارهای داخل افزاره معادلات آهنگ حامل در نواحی مختلف آشکارساز را تعیین می‌کنیم. با تبدیل این معادلات ریاضی به روابط مدارى متناظر آن، یک مدار معادل برای SAM-APD بدست می‌آوریم. با مدل ارائه شده، بهره، بازده کوانتومی و جریان تاریک افزاره را بررسی می‌کنیم. نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی مقایسه می‌شود. مطابقت خوب این مدل با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که این مدل قادر است به ازای تغییر پارامترهایی مثل ولتاژ بایاس، ابعاد نواحی و طول موج نور رفتار آشکارساز را با تقریب قابل قبولی پیش‌بینی کند.

کلیدواژه: آشکارساز نوری بهمنی، جذب فوتون، شکست بهمنی، مدار معادل.

۱- مقدمه

امروزه آشکارساز نوری بهمنی (APD) در اکثر سیستم‌های مخابرات نوری به‌کار می‌رود. وجود بهره در APD، مهمترین عاملی است که این افزاره را از سایر آشکارسازهای نوری مانند PIN و MSM متمایز می‌کند. از اوایل دهه ۱۹۸۰ کارهای مختلفی در زمینه ساخت و اندازه‌گیری پارامترهای APD انجام شده است. به تدریج با گسترش این فعالیت‌ها، ساختارهای جدیدتری مطرح شده است. از جمله، می‌توان به ساختارهای ابرشبکه‌ای ارائه شده در مراجع [۱] و [۲] و همچنین آشکارساز نوری بهمنی با نواحی جذب و تکثیر مجزا (SAM-APD) اشاره کرد [۳] و [۴]. در این ساختارهای نوین، نسبت به ساختار معمولی، نویز و جریان تاریک کم‌تر و بهره جریان و ولتاژ شکست در لبه پیوند بزرگ‌تر است.

طراح افزاره، با در دست داشتن مدل مدارى یک آشکارساز نوری، قادر خواهد بود، علاوه بر تعیین حساسیت گیرنده، رفتار خروجی APD طراحی شده را قبل از ساخت قطعه مشاهده کند. تاکنون تنها برای افزاره‌ای که در آن فرایندهای جذب فوتون و تکثیر حامل هر دو در یک ناحیه رخ می‌دهد، مدل مدارى ساده‌ای گزارش شده است [۵]. در حالی که برای

این مقاله در تاریخ ۲۵ تیر ماه ۱۳۸۲ دریافت و در تاریخ ۳ مهر ماه ۱۳۸۲ بازنگری شد.

محمد سروش، گروه الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: msoroosh@modares.ac.ir)

محمد کاظم مروج فرشى، گروه الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
عباس ظریفکار، گروه سیستم‌ها و فن‌آوری نوری، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، تهران.

ضریب بازتاب از سطح آشکارساز است.

برای دستیابی به الگوی مدار معادل برای افزاره، باید ابتدا کمیت‌های فیزیکی را به کمیت‌های مداری تبدیل کنیم. بدین منظور، کمیت C_{n_0} 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:

$$V_1 \equiv \frac{qn_{p^+}}{C_{n_0}}, V_2 \equiv \frac{qn_i}{C_{n_0}}, V_3 \equiv \frac{qP_m}{C_{n_0}}, V_4 \equiv \frac{qP_n}{C_{n_0}} \quad (9)$$

متناظر با این پتانسیل‌ها و آهنگ جذب فوتون در نواحی آشکارساز، برای نواحی چهارگانه به ترتیب مقاومت‌های معادل R_1 تا R_4 :

$$R_1 \equiv P_{in} / qN_{GP}, R_2 \equiv P_{in} / qN_{Gi} \quad (10)$$

$$R_3 \equiv P_{in} / qP_{Gm}, R_4 \equiv P_{in} / qP_{Gn}$$

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

$$R_m \equiv \tau_{prm} / C_{n_0}, R_p \equiv \tau_{prn^+} / C_{n_0} \quad (11)$$

$$R_n \equiv \tau_{nrp^+} / C_{n_0}, R_i \equiv \tau_{nri} / C_{n_0}$$

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

$$R_{ti} \equiv \tau_{nti} / C_{n_0}, R_{tm} \equiv \tau_{ptm} / C_{n_0} \quad (12)$$

و بالاخره متناظر با تکثیر حامل در ناحیه تکثیر p جریان I_m

$$I_m \equiv C_{n_0} V_3 (\alpha v_{nm} + \beta v_{pm}) \quad (13)$$

را تعریف می‌کنیم. با استفاده از کمیت‌های معرفی شد در روابط (۹) تا (۱۳)، روابط (۱) تا (۴) را می‌توان به ترتیب به صورت روابط (۱۴) تا (۱۷) بازنویسی کرد:

$$\frac{P_{in}}{R_1} = C_{n_0} \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{R_n} + I_n \quad (14)$$

$$\frac{P_{in}}{R_2} + I_n = C_{n_0} \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{R_i} + \frac{V_2}{R_{ti}} \quad (15)$$

$$\frac{P_{in}}{R_3} + I_m + I_p = C_{n_0} \frac{dV_3}{dt} + \frac{V_3}{R_m} + \frac{V_3}{R_{tm}} \quad (16)$$

$$\frac{P_{in}}{R_4} = C_{n_0} \frac{dV_4}{dt} + \frac{V_4}{R_p} + I_p \quad (17)$$

جریان خروجی APD عبارتست از [۵]:

$$I_{out} = I_n + I_{mt} + I_{it} + I_{dark} + (C_S + C_J) dV_{bias} / dt \quad (18)$$

C_S و C_J به ترتیب خازن پارازیتی و خازن پیوند، $I_{dark} \equiv V_3 / R_{mt}$ و $I_{it} \equiv V_3 / R_{ti}$ جریان تاریک آشکارسازند:

$$I_{dark} = \frac{\Theta_1 A X^* V_J (X^* V_J + V_{bi}) \exp\left(-\frac{\Theta_1 w_m}{X^* V_J + V_{bi}}\right)}{w_m} + \frac{V_J}{(X+1)R_d} \quad (19)$$

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 N_{GP} آهنگ تولید حامل‌ها، از طریق جذب فوتون، در ناحیه p^+ ، و عبارت‌های دوم و سوم به ترتیب آهنگ ترکیب الکترون در ناحیه p^+ و آهنگ نفوذ الکترون‌ها از آن ناحیه را نمایش می‌دهد.

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

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 جذب‌اند. در سمت راست معادله، عبارت N_{Gi} آهنگ تولید حامل‌ها، از طریق جذب فوتون، در ناحیه ذاتی، 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 [۵].

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

در ناحیه p (تکثیر)

که I_p جریان نفوذ حفره‌ها از ناحیه n^+ به ناحیه تکثیر، p_m تعداد زوج حامل‌های تکثیرشده، τ_{prm} و τ_{ptm} 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. در سمت راست معادله، عبارت 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 [۵].

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

که p_{n^+} تعداد حفره‌های ناحیه n^+ ، و τ_{prn^+} طول عمر ترکیب حفره در ناحیه n^+ است. در سمت راست معادله، عبارت 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.

آهنگ تولید حامل‌ها، از طریق جذب فوتون، در نواحی چهارگانه آشکارساز با روابط (۵) تا (۸) بیان می‌شود:

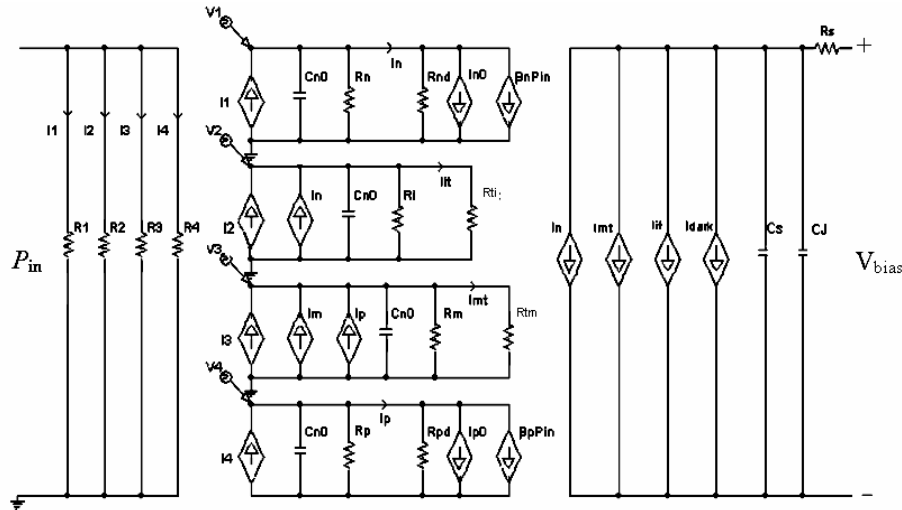
$$N_{GP} = \frac{P_{in} (1-R)}{h\nu} [1 - e^{-\alpha_p w_p}] \quad (5)$$

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

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

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

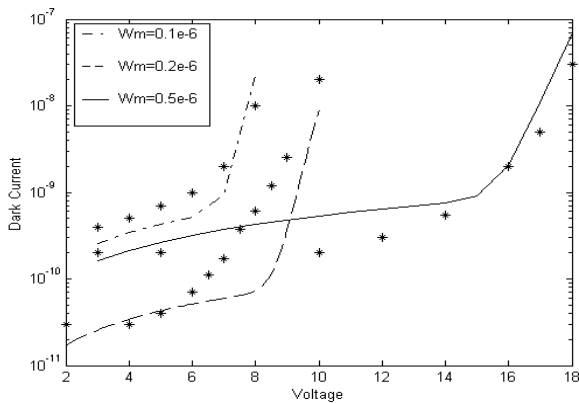
که $\alpha_n, \alpha_m, \alpha_i, \alpha_p$ ضرایب جذب فوتون به ترتیب در نواحی p^+ ، i (جذب)، p (تکثیر)، و n^+ ، w_n, w_p, w_m, w_i عرض نواحی جذب، تکثیر، p^+ و n^+ ، $h\nu$ انرژی فوتون، P_{in} توان فوتون فرودی و R



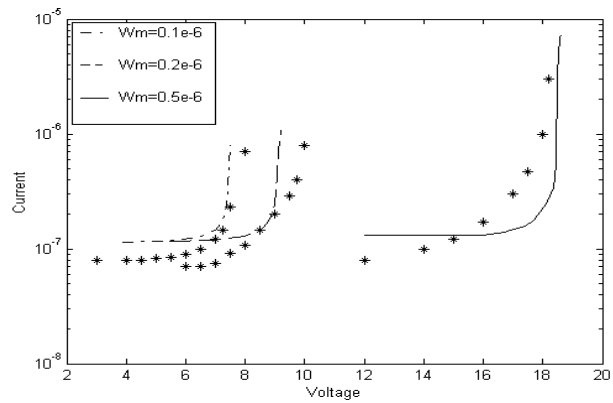
شکل ۲: مدار معادل SAM-APD.

جدول ۱: مشخصات SAM-APD نمونه [۶] و [۷].

$N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$V_{sn} = 10^7 \text{ cm/s}$	$\tau_{pr} = 0/2 \text{ ns}$
$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$V_{sp} = 10^7 \text{ cm/s}$	$\tau_{nr} = 0/2 \text{ ns}$
$N_i = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$F_{th} = 3500 \text{ V/cm}$	$\tau_p = 1 \text{ ns}$
$w_i = 1/5 \mu\text{m}$	$a_n = 2/5 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$	$\tau_n = 0/2 \text{ ns}$
$w_{p^+} = 0/03 \mu\text{m}$	$b_n = 1/4 \times 10^6 \text{ V/cm}$	$\mu_p = 400 \text{ cm}^2/V_s$
$w_{n^+} = 0/13 \mu\text{m}$	$c_p = \sqrt{2}$	$\mu_n = 8000 \text{ cm}^2/V_s$
$\alpha(\text{cm}^{-1}) = 2/5 \times 10^4$	$a_p = 6/2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$	$\epsilon_s = 13/18$
$m_c = 0/068 m_0$	$b_p = 1/15 \times 10^6 \text{ (V/cm)}$	$C_s = 1 \text{ pf}$
$E_g = 1/43 \text{ ev}$	$c_p = \sqrt{4}$	



شکل ۴: جریان تاریک آشکارساز برحسب ولتاژ به ازای ۳ عرض مختلف برای ناحیه تکثیر. نماد * نمایشگر داده‌های تجربی برگرفته شده از مرجع [۶] است.

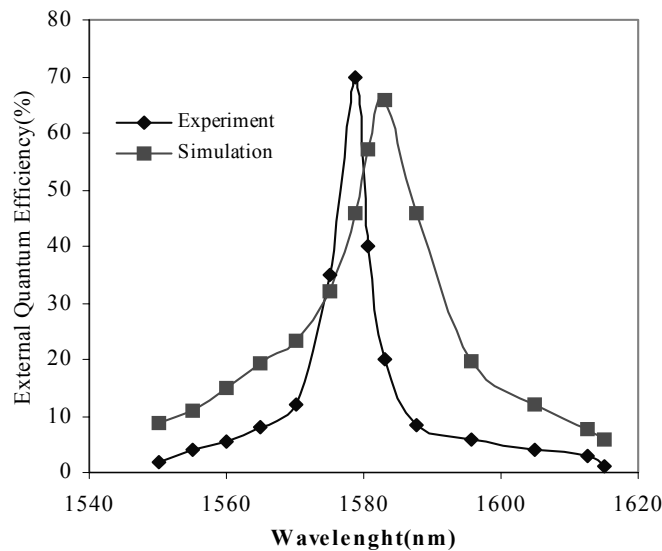


شکل ۳: جریان خروجی آشکارساز (I_{out}) برحسب ولتاژ به ازای ۳ عرض مختلف ($w_m = 0/1, 0/2, 0/5 \mu\text{m}$) برای ناحیه تکثیر. نماد * نمایشگر داده‌های تجربی برگرفته شده از مرجع [۶] است.

۳- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد مدار معادل پیشنهاد شده و مقایسه خروجی آن با مقادیر اندازه‌گیری شده، از پارامترهای یک SAM-APD نمونه ارائه شده در جدول ۱، برگرفته شده از مراجع [۶] و [۷]، استفاده شده است. جریان خروجی (I_{out}) و جریان تاریک (I_{dark}) آشکارساز را برحسب ولتاژ بایاس، به ازای ۳ اندازه مختلف ($w_m = 0/1, 0/2, 0/5 \mu\text{m}$)، برای پهنای ناحیه تکثیر، شبیه‌سازی کرده‌ایم. نتایج حاصل به ترتیب، در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. به منظور مقایسه نتایج حاصل

که در آن $\Theta_\gamma = \sqrt{2\pi\gamma\sqrt{m_c}E_g^{3/2}}/qh$ ، $\Theta_1 = \sqrt{2m_cq^3/E_g}/h^2$ ، $X^* = X/X + 1$ ، و همچنین h ثابت پلانک، E_g شکاف انرژی ماده، m_c جرم موثر حامل و γ ضریبی ثابت است. عبارت اول در رابطه (۱۴) جریان تونل‌زنی و عبارت دوم جریان نشستی پارازیتی را نشان می‌دهد. با استفاده از روابط فوق مدار معادل یک SAM-APD به دست می‌آید، که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵: تغییرات بازده کوانتومی برحسب طول موج [۸].

نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده - بدست آید. با افزایش طول موج تابش، آهنگ جذب کم می‌شود از طرفی فوتونها در فاصله نزدیکتری نسبت به ناحیه تکثیر جذب می‌شوند و آهنگ بازترکیب فتوحاملها کم می‌شود. بنابراین برآیند این دو پدیده باعث می‌شود که بازده کوانتومی در طول موج خاصی بیشترین مقدار را داشته باشد.

تفاوت مقدار ماکزیمم بازده کوانتومی بدست آمده از مدل مداری با مقدار اندازه‌گیری شده را می‌توان به کم کردن عرض ناحیه تخلیه (فرض مدل‌سازی) نسبت داد. همچنین بخشی از ناحیه تخلیه پیوند که در ناحیه n^+ قرار می‌گیرد را در نظر نگرفته‌ایم. با افزایش فاصله ناحیه تکثیر تا محدوده‌ای که فوتون جذب می‌شود آهنگ ترکیب فتوالکترون بیشتر می‌شود بنابراین فتوالکترون کمتری به ناحیه تکثیر می‌رسد. از طرف دیگر با فرض قبل، ناحیه تکثیر را کوچکتر کرده‌ایم بنابراین با کاهش عرض ناحیه تکثیر، تعداد حامل کمتری تولید می‌شود. همچنین بر اثر جنبش حرارتی، تعداد اندکی الکترون در ناحیه تکثیر تولید می‌شود که می‌توانند در تکثیر بهمنی شرکت کنند و اثر این حاملها را در مدل مداری لحاظ نکرده‌ایم. بنابراین جریان نوری حاصل از مدل مداری کوچکتر از مقدار اندازه‌گیری شده خواهد بود.

۴- 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 آهنگ حامل، مدل مداری نسبتاً ساده‌ای بدست آوردیم که مشخصات خروجی آشکارساز را با تقریب خوبی پیش‌بینی می‌کند. برای تایید این امر، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج تجربی برگرفته شده از مراجع [۶] تا [۸] مقایسه شده است.

با داشتن مدل مداری می‌توان نویز و حساسیت گیرنده را آنالیز کرد. همچنین می‌توان با پیش‌بینی بهره و نویز آشکارساز، تقویت‌کننده 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.

از شبیه‌سازی با نتایج تجربی، مقادیر تجربی برگرفته شده از مرجع [۶] با نماد '*' در این دو شکل نمایش داده شده است.

از شکل ۳ ملاحظه می‌شود که به ازای یک بایاس معین، با افزایش پهنای ناحیه تکثیر جریان خروجی آشکارساز کاهش می‌یابد. این پدیده را می‌توان به کاهش میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر 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 می‌یابد از طرفی جریان تاریک بدنه و جریان تاریک سطح زیاد می‌شود بنابراین تغییرات جریان تاریک مجموع اثرات فوق خواهد بود.

نتایج جریان تاریک حاصل از مدل به ازای $w_m = 0/5$ بیش از مقادیر تجربی است در صورتی که برای مقادیر دیگر w_m ، عکس این موضوع صادق است. در توجه این رفتار باید گفت که برای تقسیم میدان الکتریکی بین نواحی جذب و تکثیر، از نسبت ماکزیمم میدان الکتریکی در این دو ناحیه (X) استفاده شده است. با افزایش عرض ناحیه تکثیر، به نظر می‌رسد که این تقریب، شدت میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر را بیش از مقدار واقعی آن در نظر می‌گیرد بنابراین جریان تاریک حاصل از مدل به ازای $w_m = 0/5$ بیش از مقدار تجربی خواهد بود.

از بررسی هر دو شکل ۳ و ۴، درمی‌یابیم که میان مقادیر خروجی حاصل از شبیه‌سازی مدار معادل پیشنهادی و مقادیر تجربی تطابق بسیار خوبی برقرار است. در واقع اختلاف موجود به خاطر فرض یکنواخت بودن میدان در نواحی جذب تکثیر است.

تغییرات بازده کوانتومی، برحسب طول موج نور جذب شده، در شکل ۵ نشان داده شده است. افزاره مورد بررسی InGaAs/InAlAs است [۸]. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، بین مقادیر خروجی مدل و داده‌های تجربی تطابق قابل قبولی وجود دارد.

تفاوت نتیجه بدست آمده و مقادیر اندازه‌گیری شده را می‌توان به فرض مدل‌سازی نسبت داد. در مدل‌سازی این افزاره فرض کردیم که تمام ناحیه p تخلیه شود، بنابراین ناحیه تخلیه پیوند pn^+ را محدود کردیم. در ولتاژهای نزدیک شکست، ناحیه تخلیه پیوند کمی از ناحیه جذب را نیز در بر می‌گیرد بنابراین فتوالکترونها زودتر به ناحیه تکثیر می‌رسند. به عبارت دیگر کم کردن عرض ناحیه تخلیه (فرض مدل‌سازی) باعث می‌شود که فاصله ناحیه تکثیر تا محدوده‌ای که فوتون جذب می‌شود بیشتر شود بنابراین انتظار داریم که ماکزیمم بازده کوانتومی، در طول موج بلندتری

مراجع

- [1] E. Gramsch, R. E. Avila, and J. Ferrer, "Development of a novel planar-construction avalanche photodiode," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 48, no. 4, pp. 211-217, Aug. 2001.
- [2] J. N. Haralson, and K. F. Brennan, "Novel edge suppression technique for planar avalanche photodiode," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, no. 12, pp. 1863-1869, Dec. 1999.
- [3] Kang, P. Mages, and A. R. Glawson, "Fused InGaAs-Si avalanche photodiodes with low-noise performances," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 11, pp. 1593-1595, Nov. 2002.
- [4] 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, no. 3, pp. 409-411, Mar. 1998.
- [5] W. Chen, and Sh. Liu, "PIN avalanche photodiodes model for circuit simulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 12, pp. 2105-2111, Dec. 1996.
- [6] 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, no. 3, pp. 482-490, Mar. 1998.
- [7] P. Bhattacharya, *Semiconductor Optoelectronic Device*, Prentice-Hall, 1997.
- [8] H. Nie, C. Lenox, G. Kinsey, and A. L. Holmes, "Resonant cavity InGaAs/InAlAs separate absorption, charge and multiplication avalanche photodiode," in *Proc. Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials Devices*, pp. 81-82, NJ, 1998.

محمد سروش تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۲ از دانشگاه‌های صنعتی اصفهان و تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است.

نامبرده در حال حاضر دانشجوی مقطع دکتری الکترونیک در دانشگاه تربیت مدرس است. زمینه تحقیقاتی وی الکترونیک نوری، آشکارسازهای مخابرات نوری و شبیه‌سازی ادوات نوری است.

عباس ظریفکار دوره کارشناسی خود را در سال ۱۳۷۰ در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک در دانشگاه شیراز به پایان رساند و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی الکترونیک را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۸۰ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. نامبرده در حال حاضر استادیار و نیز مسئول پروژه DWDM در مرکز تحقیقات مخابرات ایران است.

زمینه‌های تحقیقاتی وی شامل مدلسازی و شبیه‌سازی ادوات الکترونیک نوری، نوین در قطعات نوری، سیستم‌های DWDM و طراحی سیستم‌های مخابرات نوری است.

محمد کاظم مروج فرشی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد فیزیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۵۵ و ۱۳۵۷ از دانشگاه‌های صنعتی شریف ایران و کالیفرنیا جنوبی (USC) آمریکا و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق و الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۵۹ و ۱۳۶۶ از دانشگاه‌های کالیفرنیا در سانتا باربارا (UCSB) آمریکا و نیو ساوث‌ویلز (UNSW) استرالیا به پایان رسانده است.

نامبرده از ابتدای سال ۱۳۵۹ تا پایان سال ۱۳۶۲ به عنوان پژوهشگر میکروویو در مرکز تحقیقات مخابرات ایران مشغول بوده است. وی در سال ۱۳۶۶ به عنوان استادیار الکترونیک به دانشگاه تربیت مدرس پیوست و در سال ۱۳۸۰ به مرتبه استادی ارتقاء یافت.

فعالیت‌های تحقیقاتی دکتر مروج در زمینه طراحی، ساخت، مدل‌سازی و شبیه‌سازی ادوات میکرو الکترونیک، و الکترونیک نوری متمرکز بوده است و حاصل آن انتشار و ارائه قریب به هفتاد مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی و داخلی است.

حاصل فعالیت‌های نامبرده در زمینه ترجمه کتاب‌های علمی عبارت است از میانی نیمه‌هادی، دیود پیوند p-n، ترانزیستور دو قطبی پیوندی، ادوات FET، و الکترونیک لیزر است. هر پنج کتاب توسط مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف منتشر شده است.

دکتر مروج، در اردیبهشت سال ۱۳۸۱، توسط وزارت علوم تحقیقات و فناوری، به عنوان یکی از اساتید نمونه کشور انتخاب و معرفی شد.