

مطالعه و بررسی عملکرد فوتودیودهای بهمنی PIN و مدل سازی مداری آنها

سعید پیرانی

دانشگاه آزاد اسلامی تبریز

deeyar – 1440 @yahoo.com

چکیده:

با توجه به پیشرفتهایی که به تازگی در عرصه فوتوالکترونیک و همچنین در زمینه تولید مدارات مجتمع فوتوالکترونیک با مقیاس بالا رخ داده، طراحان با این مشکل که چگونه می توان سریعاً یک مدار مجتمع فوتوالکترونیک را طراحی کرده و عملکرد آنرا به ازای ورودی های مختلف بررسی کرد، مواجه شده اند. آنگونه که بنظر می رسد تنها عاملی که می تواند ما را در این راستا یاری دهد، استفاده از شبیه سازها و تجزیه تحلیل های بر پایه محاسبات کامپیوتری است. در این مقاله مدل مداری مناسبی برای دیودهای نوری PIN بهمنی (APDs) براساس مطالعات نرخ ارائه شده و سپس مدل مداری PIN – APD توسط نرم افزار Pspice شبیه سازی می شود. نتایج بدست آمده از شبیه سازی، منطبق بر مشخصات عملکردی In_{0.53}Ga_{0.49}As-InP PIN-APD است.

کلمات کلیدی: دیود نور PIN، مدل مداری، جریان تاریکی، جریان نوری، Pspice

1-مقدمه:

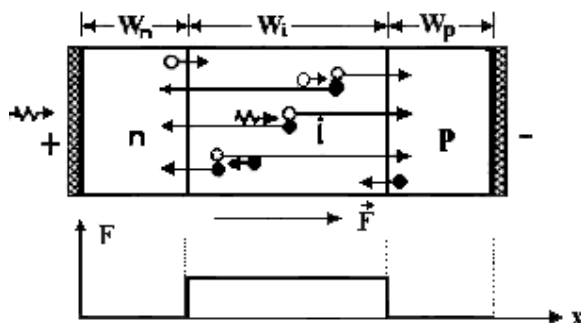
آشکارسازنوری (Photodetector) یک قطعه الکترونیک نوری است که انرژی نوری را جذب و آن را به انرژی الکتریکی که معمولاً جریان نوری است تبدیل می کند. بطور کلی سه مرحله در فرآیند آشکارسازی نوری وجود دارد: (1) جذب انرژی نور و تولید حاملها (2) انتقال با بهره یا بدون بهره حاملهای تولید شده بوسیله نور از ناحیه جذب یا گذار (3) جمع آوری حاملها و تولید جریان نوری که در مدار خارجی جاری می گردد. آشکار سازهای نوری بطور گسترده در سیستم های مخابراتی نوری بکار گرفته می شوند. در این کاربرها، آشکار سازها پالس های نوری ارسالی را دریافت نموده و با کمترین تلفات ممکن آنرا به پالس های الکتریکی که برای تلفن، کامپیوتر یا هر وسیله دیگری که در پایانه گیرنده مناسب می باشد، تبدیل می کند. در کاربردهای مخابراتی معمولاً به آشکار سازهای سریع نیاز است، در حالیکه در کاربردهای مختلف دیگر ممکن است حساسیت مورد لزوم باشد. حساسیت و سرعت عملکرد در آشکار سازها جزو پارامترهایی هستند که باید بین آنها موازنه و مصالحه کرد و بسته به کاربرد مشخص می شود که کدام نوع آشکار ساز نوری مناسب تر است. سه نوع عمده از آشکار سازهای نوری عبارتند از: نور رسانا (Photoconductor)، دیودهای نوری پین (PIN) و دیودهای نوری بهمنی (Avalanche PhotoDiode). نور رساناها ساده ترین نوع آشکار سازهای نوری هستند که عملکردشان بر مبنای افزایش رسانایی در یک ناحیه مشخص در اثر تحریک نوری است. دیود نوری پیوندی رایجترین نوع آشکار ساز است و با هر ماده نیمه هادی که در آن یک پیوند p-n شکل بگیرد می توانند ساخته شوند، مبنای اصلی عملکردشان بسیار ساده است و تحت بایاس معکوس کار می کنند و در این حالت لایه تخلیه عریض است. واضح

است که داشتن یک ناحیه تخلیه عریض که امکان جذب فوتونهای بیشتری را فراهم می کند باعث بالا رفتن حساسیت قطعه می شود که این خود افت در سرعت عملکردی قطعه را به خاطر افزایش زمان رانش حاملها از ناحیه جذب در پی خواهد داشت.

در دیودهای نوری پیوندی PIN که خود نوعی از دیودهای پیوندی هستند، یک ناحیه آرایش نشده i بین نواحی P^+ و n^+ قرار داده می شود و بعلاوه اینکه چگالی حاملهای آزاد در ناحیه i بسیار پایین است و مقاومت این ناحیه بالا است، تقریباً تمام بایاس معکوس اعمالی به دو سر لایه i می افتد. اگر چه این نوع آشکار سازها بصورت گسترده ای در سیستم های فیبر نوری کاربرد دارند و از سرعت عملکردی خوبی برخوردارند، بزرگترین نقصی را که می توان به آنها گرفت، نداشتن بهره داخلی است که توانایی آنها را در آشکار سازی نورها با سطح انرژی پایین به شدت محدود می کند و از اینجاست که برای تامین این خواسته دیودهای نوری بهمنی (APDs) وارد عرصه عمل می شوند. این قطعات اساساً یک پیوند $p-n$ هستند که بطور معکوس بایاس شده و در ولتاژی نزدیک به ولتاژ شکست معکوس کار می کنند که در آنها حاملهای نوری تولید شده در منطقه تخلیه، حین انتقالشان، با کسب انرژی کافی از میدان و بوجود آوردن یونیزاسیون ضربه ای (Impact ionization) در یک فرآیند بهمنی ایجاد بهره می کنند.

2- مدل مداری یک PIN – APD :

ساختار بلوکی شکل (1) متعلق به یک PIN – APD است و در آن برای راحتی محاسبات و استنباط ها فرض شده که نور از جانب سطح n قطعه به آن تابیده می شود، که اگر نور از سطح p هم تابیده شود، باز فرق چندانی بوجود نمی آید و تنها به اندکی تغییر و تبدیل نیاز پیدا می گردد. برای شروع بررسی ساختار دیودهای نوری PIN می توان فرض کرد که: (1) پهنای ناحیه تخلیه در نواحی p ، n بسیار کوچکتر از پهنای ناحیه هستند و از این نواحی تخلیه در مقابل ناحیه



شکل شماره (1): بناگرام بلوکی یک PIN-APD

آصرفنظر می شود. (2) اندازه میدان الکتریکی در ناحیه i مقدار یکنواخت و در نواحی p ، n این مقدار صفر است. برای اطمینان از صحت فرضهای بالا لازم است که میزان ناخالصی در ناحیه i نسبت به نواحی دیگر بسیار کمتر باشد. جریانی که از وجه مشترک $n-i$ می گذرد شامل دو بخش است: یکی جریانهای نفوذی مربوطه به حاملهای اقلیت در ناحیه n و دیگری جریانهای رانشی مربوط به الکترونهای ناحیه i ، این الکترونها مربوطه به ناحیه i در حقیقت همان الکترونهایی هستند که در اثر یونش ضربه ای حاصل از برخورد نور به قطعه و تولید جفتهای الکترون – حفره در ناحیه i و نیز الکترونهایی که بصورت نفوذ حاملهای اقلیتی، از ناحیه p به ناحیه i راه یافته اند می باشد. در حالتی که دیود PIN ما در بایاس معکوس قرار دارد می توان روابط زیر را برای نواحی i ، n نوشت.

ناحیه n :

$$\frac{dP_n}{dt} = P_G - \frac{P_n}{t_p} - \frac{I_p}{q} \quad (1)$$

ناحیه p :

$$\frac{dN_p}{dt} = N_G - \frac{N_p}{t_n} - \frac{I_n}{q} \quad (2)$$

ناحیه i :

$$\frac{dN_i}{dt} = N_{Gi} + v_n \zeta_n N_i + v_p \zeta_p P_i - \frac{N_i}{t_{nt}} - \frac{N_i}{t_{nr}} + \frac{I_n}{q} \quad (3)$$

$$\frac{dP_i}{dt} = P_{Gi} + v_n \zeta_n N_i + v_p \zeta_p P_i - \frac{P_i}{t_{nt}} - \frac{P_i}{t_{nr}} + \frac{I_p}{q} \quad (4)$$

که در روابط بالا N_p و P_n حفره ها و الکترونهای اضافی (حفره و الکترونهای مازاد بر تعداد مورد نیاز برای تکمیل ساختار پیوندی ماده نیمه رسانا، که عموماً توسط ناخالص های دهنده تولید می شود)، در ناحیه n ، P_i ، N_i حفره ها و الکترونهای اضافی موجود در ناحیه i ، q بار الکتریکی الکترون ، t_n و t_p طول عمر الکترونها و حفره هادر نواحی p و n ، t_{nr} و t_{pr} طول عمر حاملها در ناحیه i ، t_{nt} و t_{pt} زمان گذرالکترونها و حفرههایی ست که در ناحیه i تولید شده اند، P_G و N_G نرخ تولید جفت های الکترون-حفره ای است که توسط نور برخوردی به قطعه در نواحی n و p تولید می شوند، $N_{Gi}(=P_{Gi})$ نرخ تولید در ناحیه i ، I_n ، I_p به ترتیب جریانهای نفوذی الکترونها و حفره ها در نواحی n, p ، v_n ، v_p سرعت رانش الکترونها و حفره ها در ناحیه i ، ζ_n ، ζ_p سرعت یونیزاسیون ضربه ای الکترون و حفره در ناحیه i هستند.

از آنجائکه در شرایط الکتریکی خنثی $P_i = N_i$ خواهد بود عبارت (3) را می توان بصورت زیر بازنویسی کرد

$$\frac{dN_i}{dt} = N_{Gi} + (v_n \zeta_n + v_p \zeta_p) N_i - \frac{N_i}{t_{nr}} - \frac{N_i}{t_{nt}} + \frac{I_n}{q} \quad (5)$$

ضمناً می توان نوشت:

$$N_G = \frac{P_{in} [(1-R) \cdot \exp[-(\alpha_n w_n + \alpha_i w_i)]]}{h\nu}$$

$$P_G = \frac{P_{in} [(1-R)(1 - \exp(-\alpha_n \cdot w_n))]}{h\nu}$$

$$N_{Gi} = \frac{P_{in} [(1-R) \exp(-\alpha_n \cdot w_n)]}{h\nu}$$

$$t_{nt} = \frac{w_i}{v_n}$$

$$t_{pt} = \frac{w_i}{v_p}$$

که P_{in} همان انرژی نور برخوردی به قطعه، R میزان منعکس کنندگی در رویه n ، $h\nu$ انرژی فوتون و α_n ، α_i و α_p ضرایب جذب در نواحی n ، i و p هستند. باید متذکر شد که بستگی سرعت رانش حاملها به میدان الکتریکی برای مواد مختلف، متفاوت است و در این رابطه می توان از فرمولهای تجربی زیر استفاده کرد.

$$v_n(F) = \frac{\mu_n F + v_{sn} \left(\frac{F}{F_{th}}\right)^4}{1 + \left(\frac{F}{F_{th}}\right)}$$

$$v_p(F) = \frac{\mu_p F}{1 + \left(\frac{\mu_p F}{v_{sp}}\right)}$$

$$\zeta_n(F) = a_n \exp[-(\frac{bn}{F})^{cn}]$$

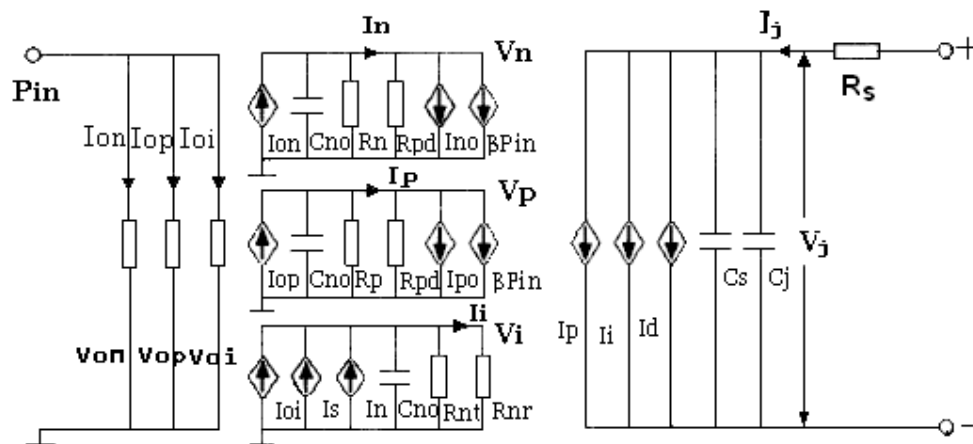
$$\zeta_n(F) = a_n \exp[-(\frac{bn}{F})^{cn}]$$

که F میدان الکتریکی در ناحیه i , $V_j, F = (V_j + V_{BI})/W_i$, ولتاژ اعمالی به قطعه، V_{BI} پتانسیل داخلی، μ_p, μ_n قابلیت تحرک الکترونها و حفره ها در ناحیه i , v_{SP}, v_{Sn} سرعت جریان رانشی اشباع الکترونها و حفره ها در ناحیه i و $a_n, b_n, c_n, a_p, b_p, c_p$ مقادیر ثابت معادلات به حساب می آیند و مقادیر آنها را می توان با مراجعه به جدول (1) پیدا کرد. در ضمن برای افزایش دقت محاسبات لازم است که مقدار ثابت C_{n0} را بصورتیکه در زیر تعریف شده وارد معادلات نماییم.

$$V_p = \frac{qP_n}{C_{n0}}, \quad V_n = \frac{qN_p}{C_{n0}}, \quad V_i = \frac{qN_i}{C_{n0}}$$

که با در نظر گرفتن روابط بالا می توان معادلات (1)، (2) و (5) را بصورتیکه در زیر آمده باز نویسی کرد:

$$\frac{P_{in}}{V_{0p}} = C_{n0} \frac{dV_p}{dt} + \frac{V_p}{R_p} + I_p \quad (6)$$



شکل شماره (2): مدل مداری یک PIN-APD

$$\frac{P_{in}}{V_{0n}} = C_{n0} \frac{dV_n}{dt} + \frac{V_n}{R_p} + I_n \quad (7)$$

$$\frac{P_{in}}{V_{0i}} = C_{n0} \frac{dV_i}{dt} + \frac{V_i}{R_{nr}} + \frac{V_i}{R_{nt}} - I_s - I_n \quad (8)$$

$$R_p = \frac{t_p}{C_{n0}}$$

$$R_n = \frac{t_n}{C_{no}}$$

جدول شماره (1): پارامترهای لازم برای مدل سازی مدار پی‌آپ‌دی

$$R_{nt} = \frac{t_{nt}}{C_{no}}$$

$$R_{nr} = \frac{t_{nr}}{C_{no}}$$

$$I_i = \frac{V_i}{R_{nt}}$$

$$I_s = C_{no} V_i (v_n \zeta_n + v_p \zeta_p)$$

$$I_{op} = \frac{P_{in}}{V_{op}}$$

$$I_{on} = \frac{P_{in}}{V_{on}}$$

$$I_{oi} = \frac{P_{in}}{V_{oi}}$$

$$I_n = \frac{V_n}{R_{nd}} + \beta_n P_{in} + I_{no}$$

$$I_p = \frac{V_p}{R_{pd}} + \beta_p P_{in} + I_{po}$$

$$R_{nd} = R_n \left[ch \left(\frac{W_p}{L_n} \right) - 1 \right]$$

$$R_{pd} = R_p \left[ch \left(\frac{W_n}{L_p} \right) - 1 \right]$$

$$I_{no} = \frac{q N_{po} L_n \left[ch \left(\frac{W_p}{L_n} \right) + 1 \right]}{W_p t_n sh \left(\frac{W_p}{L_n} \right)}$$

$$N_{po} = n_{po} A W_p$$

$$I_{po} = \frac{q p_{no} L_p \left[ch \left(\frac{W_n}{L_p} \right) + 1 \right]}{W_n t_p sh \left(\frac{W_n}{L_p} \right)}$$

$$P_{no} = p_{no} A W_n$$

که L_n و L_p طول نفوذ حفره ها و الکترونها در نواحی n و p هستند. و جریان کلی که از APD میگذرد معادل است با:

$$I_J = I_p + I_i + C_T \frac{dV_j}{dt} + I_d \quad (9)$$

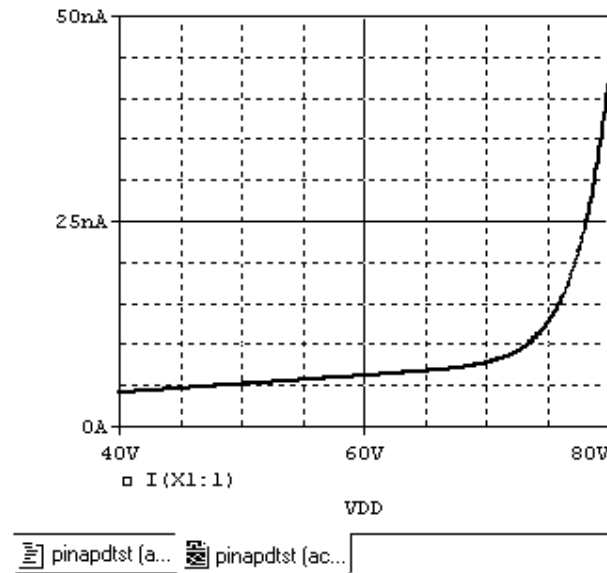
پارامتر	ارزش	پارامتر	ارزش
$A(\mu m^2)$	12000	$\mu_n (Cm^2 / vs)$	10500
$W_n(\mu m)$	2	$v_n (Cm / s)$	10^7
$W_i(\mu m)$	4.2	$F_{th} (V / Cm)$	3500
$W_p(\mu m)$	2	$\mu_p (Cm^2 / vs)$	300
$\lambda(\mu m)$	0.61	$v_{sp} (Cm / s)$	10^7
R	0.35	$t_p (ns)$	1
$\alpha_n (Cm^{-1})$	0	$t_n (ns)$	0.2
$\alpha_p (Cm^{-1})$	30	$t_{nr} (ns)$	0.2
$\alpha_i (Cm^{-1})$	30	$D_p (Cm^2 / s)$	5.2
$V_{BI} (V)$	0.8	$D_n (Cm^2 / s)$	260
$n_{ni} (Cm^{-2})$	3.3×10^6	$a_n (Cm^{-1})$	5.13×10^7
$n_{pi} (Cm^{-2})$	7.3×10^{11}	$b_n (V / Cm)$	1.95×10^6
$N_d (Cm^{-2})$	5×10^{18}	c_n	1
$N_s (Cm^{-2})$	5×10^{18}	$a_p (Cm^{-1})$	7.3×10^7
$R_d (\Omega)$	10^{10}	$b_p (V / Cm)$	2.2×10^6
$C_s (pF)$	1.0	c_p	1
$R_s (\Omega)$	5	ϵ_n	12
$m_c (m_0)$	0.041	$E_g (eV)$	0.75
γ	1.1		

که $C_T = C_s + C_j$ و C_s نشان دهنده مجموع آثر خازنی قطعه است ، $C_j = \epsilon_0 \epsilon_s A / W_i$ ، V_j ولتاژ پیوند، A سطح مقطع موثر در مقابل میدان الکتریکی، I_d جریانی ست که در اثر تونل زنی حاملها و دیگر جریانه‌های ناشی تولید می شود. حال براساس روابطی که از (6) تا (9) بیان شده اند می توان مدل مدار یک PIN-APD را آنچنان که در شکل (2) آمده نشان داد.

3- شبیه سازی کامپیوتری:

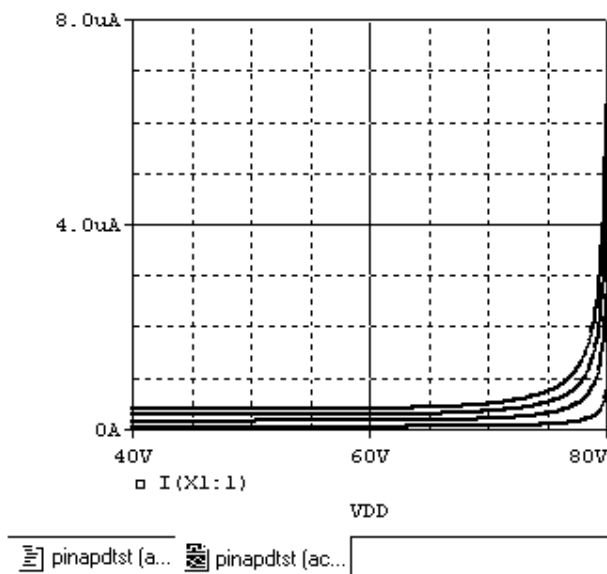
در این مقاله قطعه ای که مورد تجزیه تحلیل و شبیه سازی قرار گرفته

است. با استفاده از مقادیر برداشته شده از جدول (1) و نیز پیاده سازی مدل مداری نشان داده شده در شکل (2) توسط نرم افزار *Pspice* می توان مدار را شبیه سازی کرده و عکس العمل آنرا به



شکل شماره (3): جریان تاریکی به صورت تابعی از ولتاژ معکوس اعمالی به قطعه

ازای تغییراتی که ممکن است در پارامترهای مختلف مدار رخ دهد بررسی کرد. همانگونه که در شکل (3) قابل مشاهده



شکل شماره (4): جریان نوری گرفته شده از PIN-APD در حالت بایاس معکوس برای چهار فوتونی که با انرژیهای مختلف با آن برخورد کرده اند

است جریان تاریکی مدار ما به ازای مقادیر کم برای بایاس، توسط جریانه‌های نفوذی و ناشی ناشی از حاملها تعیین شده و به ازای مقادیر بزرگ برای بایاس، این جریانه‌های ناشی از تونل زنی حاملهاست که نقش اساسی و تعیین کننده را بازی می کند و این همان چیز است که در نموداری که توسط *Pspice* تحلیل شده، قابل مشاهده است و ضمناً آنچه که مورد انتظار ماست در انطباق است .

در نمودار شکل (4) هم جریان نوری دیود به ازای چهار فوتونی که با انرژیهای 100، 75، 50، 25 وات به قطعه برخورد کرده اند نمایش داده شده است و آنچنان که از منحنی بر می آید به ازای بایاسهای کم، جریان به صورت خطی ثابت و دارای مقداری محدود است و زمانی که ما مقدار بایاس معکوس اعمالی به قطعه را تا حدود ولتاژ شکست آن

افزایش می دهیم ، شاهد افزایش شدیدی در جریان نوری قطعه هستیم. لازم بذکر است که منحنی های جریان تاریکی و نوری از اساسی ترین مشخصه های آشکار سازهای نوری به حساب می آیند. در اینجا باید گفت که ما به

هدفی که در ابتدای مقاله به آن اشاره کردیم، یعنی همان ارائه یک مدل مداری برای PIN APD و شبیه سازی عملکرد مداری آن توسط نرم افزارهای رایج (مانند Hspice و یا Pspice) رسیده ایم و تمامی شبیه سازیها و نتایج مندرج در مقاله با استفاده از فایلی که برای این مدل مداری در اختیار بوده انجام گرفته لذا این مدل را می توان با کمی تغییر در بعضی از پارامترهایی که در جدول (1) به آنها اشاره شده برای سایر انواع PIN-APD ها (که از موادی متفاوت با قطعه ای که در این مقاله از آن استفاده شده) بکار برد. امید است اضافه شدن این مدل مداری به کتابخانه قطعات فوتوالکترونی بتواند موجبات تسهیل در طراحی آشکار سازهای نوری را سبب گردد.

4- نتیجه گیری و پیشنهادات :

در این مقاله بادر نظر گرفتن تعدادی فرض و نیز جایگزینی کمیت‌های مداری بجای مقادیر نورانی، مدل مداری PIN – APD استخراج شد. اگر چه بهره داخلی APD در بسیاری از مصارف بسیار موثر است، ولی خوب وجود عواملی چون داشتن ساختار پیچیده، بالا بودن مقدار بایاس اعمالی به آنها (که خود سبب بالا رفتن هزینه های ناشی از بکارگیری آنها می شود)، حساسیت شدید بهره بهمنی آنها به دما و ولتاژ بایاس و بالا بودن نسبی جریان تاریکی آنها، کاربرد APD ها را در بعضی از مصارف محدود کرده است که در این راستا و به منظور کاهش جریان تاریکی این نوع قطعات مدل های دیگری از آنها که نواحی جذب و ضرب کنندگی حاملها را از هم جدا کرده اند پیشنهاد شده و از آنها تحت عنوان SAM-APDs (Separate Absorption and Multiplication) نام برده می شود.

5- سپاسگذاری :

در اینجا لازم میدانم که از کمکهای آقای دکتر رسولی که در مراحل مختلف نگارش مقاله با پاسخ گویی به سوالات من، مرا یاری نمودند نهایت تشکر را بنمایم.

6- فهرست مراجع و ماخذ:

- [1] Shun Lien Chuang , "Physics Of Optoelectronic Devices , John Wiley & Sons , Inc , 1995 .
- [2] Pallab Bhattacharya , "Semiconductor Optoelectronic Devices", Prentice , Hall Of India , 2003 .
- [3] Weiyong Chen And Shiyong Lio , "PIN Avalanche Photodiodes Model For Circuit Simulation " IEEE Journal Of Quantum Electronics , Vol. 32 , N. 12 , DECEMBER 1996.
- [4] Brock Koren , " Large Area Avalanche Photodiodes Challang PMTs"
- [5] N. Susa, H. Ando, And H. Kanbe, "Characteristics In InGaAs/InP Avalanche Photodiodes With Separated Absorption And Multiplication Regions, " IEEE J. Quantum Electron, Vol. QE-17 , pp.243-254, 1981.
- [6] http://oedcad.jlu.edu.cn/e_wgdesi.htm