آنالیز و بررسی یک پین دیود بهینه شده

حامد شهرکی[1]، شهامت کهن[2]، فرزین امامی[3]

[1]استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایرانشهر، h.shahraki@velayat.ac.ir
[2]کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، shahamat.kohan1398@gmail.com
[3]دانشیار، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، emami@sutech.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک ساختار جدید از پین دیود معرفی شده است. این ساختار جدید با نفوذ دادن لایه هایی از جنس لایه میانی (با ناخالصی کم)، به درون لایه های پیرامونی (با ناخالصی خیلی زیاد) ایجاد شده است. پین دیود پیشنهادی، بازه فرکانس عمل گسترده تری نسبت به پین دیود رایج دارد. در ساختار جدید با افزایش ضخامت موثر ناحیه ذاتی(I) نسبت به پین دیود معمولی، پهنای فرکانس کاری افزایش یافته است. ساختار پیشنهادی خازن کوچکتری (در بایاس معکوس) نسبت پین دیودهای رایج دارد که آن را برای کاربرد در سوییچ ها ایده آل می سازد. همچنین در ساختارجدید، ولتاژ شکست در مقایسه با ساختار رایج افزایش یافته است. از این پین دیود می توان در مدولاتورها و دمودلاتورها و ضرب کننده های سیگنال استفاده کرد.

واژه های کلیدی

پین دیود، لایه ذاتی، ولتاژ شکست

مقدمه

امروزه نیاز به طراحی روش های جدید برای ساخت المان های الکترونیکی مخصوصا در فرکانس های بالا بیش از هر زمان حس می شود. با افزایش فرکانس کاربردی در یک ابزار الکترونیکی، بتدریج خازن ها و مقاومت های بکار گرفته شده از حالت ایده آل خود فاصله گرفته و ویژگی های نامطلوب نشان می دهند.

پین دیود ها از جمله المان هایی هستند که می توانند در حل این مساله نقشی تاثیرگذار داشته باشند. یک پین دیود در فرکانس های مایکروویووی می تواند عملکردی مشابه یک مقاومت متغیر داشته باشد.

البته کاربردهای پین دیود تنها به ایجاد المان های الکترونیکی محدود نمی شود و می توان از آن ها برای ساخت تشدید کننده [2] و مدار سوییچ [3] استفاده کرد.

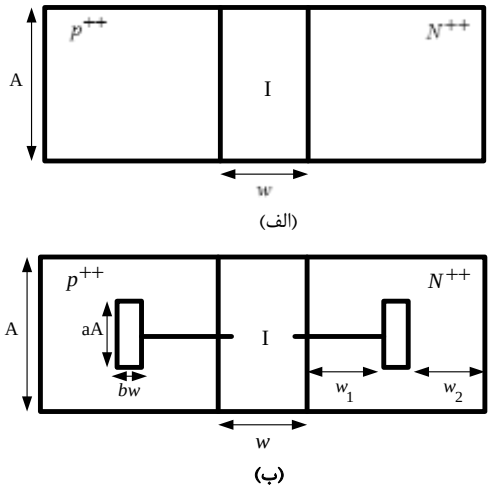
کاربرد پین دیود به عنوان المان مقاومتی متغیر، البته دارای محدودیت های فرکانسی است بطوری که:

اگر فرکانس سیگنال اعمالی به پین دیود از یک مقدار حداقل f_t کمتر باشد، پین دیود رفتاری مشابه یک دیود معمولی خواهد داشت[1].

از سوی دیگر، عملکرد پین دیود در فرکانس های کم بسیار حائز اهمیت است و در نتیجه بهینه سازی ساختاری پین دیود در راستای کاهش فرکانس f_t امری مطلوب می نماید.

در این مقاله با نفوذ دادن لایه هایی از جنس لایه ذاتی I، به درون لایه های با ناخالصی خیلی زیاد (p^{++} و n^{++})، یک پین دیود جدید معرفی می شود که f_t این ساختار نسبت به پین دیود رایج کاهش یافته است. لایه های نفوذی کاملا یکسان و هم پتانسیل می باشند.

از نرم افزار MATLAB برای شبیه سازی در این مقاله استفاده شده است.



شکل 1: نمای (الف): پین دیود رایج، (ب): پین دیود پیشنهادی

پین دیود پیشنهادی

در حالت کلی، یک پین دیود از سه لایه به صورت p^{++} -I- n^{++} تشکیل شده است که مقاومت الکتریکی نواحی پیرامونی p^{++} و n^{++}

به دلیل ناخالصی بسیار زیاد، کم است و ولتاژ اعمالی به دو سر قطعه عملا بر روی دو سر ناحیه I می افتد[1].

در شکل 1 ساختار پین دیود رایج و پیشنهادی نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، دو لایه کاملا یکسان از نظر اندازه و از جنسی مشابه لایه ذاتی (ضخامت w و مساحت A) به لایه های با ناخالصی خیلی زیاد نفوذ داده شده اند. ضخامت و مساحت نواحی نفوذ داده شده به ترتیب برابر با bw و aA می باشند. a,b اعداد طبیعی کوچکتر از واحد هستند.

وجود نواحی نفوذ داده شده می تواند از چند جهت سودمند باشد: از یک سو، در این ساختار نواحی 1و2 به دلیل داشتن سطح تماس با نواحی n و p می توانند حامل ها را با سرعت بیشتری دریافت کنند. این افزایش سطح موثر، سرعت ریخته شدن حامل ها به ناحیه ذاتی میانی را افزایش می دهد که این خود باعث افزایش کیفیت سیگنال هنگام عبور از پین دیود پیشنهادی نسبت به پین دیود رایج می شود. از سوی دیگر، نشان داده خواهد شد که با نفوذ نواحی 1و2 به درون نواحی n و p بدون افزایش طول قطعه (و تلفات) می توان f_t را کاهش داد.

فرض می شود که مساحت و ضخامت نواحی 1و2 به ترتیب A′وw′ باشد. با توجه به هم پتانسیل بودن نواحی 1و2 با ناحیه I، منحنی مشخصه پین دیود پیشنهادی در بایاس مستقیم نسبت به حالت قبل تغییر نمی کند.

در لایه ذاتی حامل ها به سرعت با هم بازترکیب نمی شوند و دارای زمان بازترکیب t_l هستند. حال اگر فرکانس اعمالی به پین دیود از مقدار f_t بیشتر باشد، حاملها با هم بازترکیب نمی شوند و آرایش آن ها با توجه به شکل موج سیگنال تغییر می کند. مقدار فرکانس f_t کاملا وابسته به مقادیر ذاتی پین دیود و ابعاد هندسی آن است[4].

اگر عرض ناحیه ذاتی I برابر w باشد آنگاه[1]:

$$f_t = \frac{1300}{w^2} \qquad (1)$$

برای افزایش بازه فرکانسی کارکرد پین دیود یا کاهش f_t ، طبق رابطه (1) می توان مقدار ضخامت ناحیه I را افزایش داد[1]. اما افزایش ضخامت ناحیه ذاتی علاوه بر این که، باعث افزایش طول قطعه می شود، موجبات افزایش مقاومت الکتریکی در این ناحیه را فراهم خواهد آورد که به افزایش تلفات منجر خواهد شد[5].

بایاس مستقیم

همان گونه که مطرح شد پین دیود در بایاس مستقیم به صورت یک مقاومت متغیر (سری شده با یک سلف) عمل میکند[1].

اگر I_f جریان عبوری از پین دیود باشد و R_1 ، R_2 و R_i به ترتیب مقاومت های نواحی 1 و2 و ناحیه I باشند، آنگاه مقدار مقاومت در بایاس مستقیم به صورت زیر محاسبه میشود:

$$R = R_1 + R_2 + R_i \qquad (2)$$

$$R = \frac{w^2}{I_f t_l (\mu_p + \mu_n)} (0.28 + 2.8b(1+ab)) \qquad (3)$$

مقاومت یک پین دیود ساده از رابطه زیر بدست می آید:

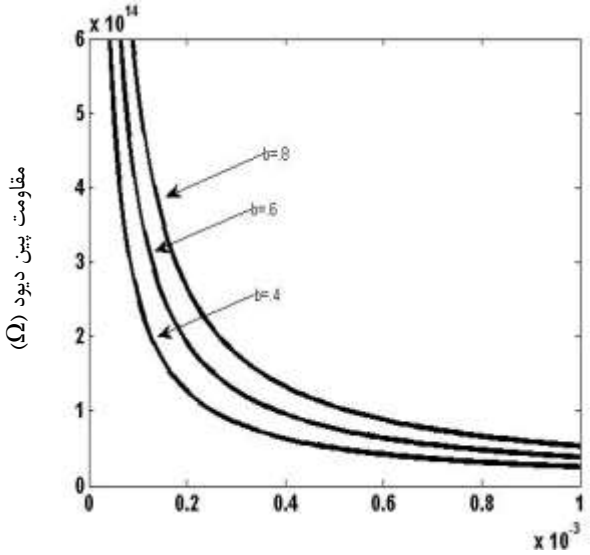
$$R_s = \frac{w^2}{I_f t_l (\mu_p + \mu_n)} \qquad (4)$$

با مقایسه روابط 3 و4 مشخص است که بدون افزایش ضخامت ناحیه ذاتی I ، مقدار موثرw در پین دیود جدید به اندازه $\sqrt{(0.28+2.8b(1+ab)}$ افزایش یافته است.

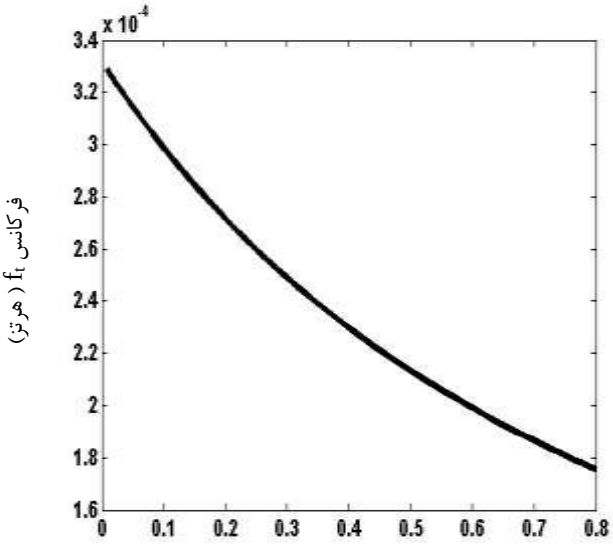
در نتیجه مطابق با رابطه (1) فرکانس f_t به اندازه $(0.28+2.8b(1+ab)$ کاهش خواهد یافت. به این ترتیب، از پین دیود پیشنهادی (در بایاس مستقیم) می توان در فرکانس های پایین تری نسبت به پین دیود رایج استفاده کرد.

در شکل 2 مقدار مقاومت پین دیود پیشنهادی و در شکل3 فرکانس f_t نسبت پارامترb ترسیم شده است.

با توجه به شکل 2 مشاهده می شود هرچه مقدار b افزایش می یابد، مقدار مقاومت پین دیود (افزایش مقدار w موثر) بزرگتر شده که به کاهش فرکانس f_t منجر خواهد شد (شکل 3) که مطالب بیان شده را تایید خواهد کرد.



شکل 2: مقاومت پین دیود بر حسب جریان به ازای مقادیر مختلف b.



شکل 3: فرکانس f_t بر حسب b.

همانطور که مشخص است، مقدار مقاومت با 2 پارامتر b و I_f کنترل می شود که این امر باعث می شود طراح، آزادی بیشتری در طراحی و جریان بایاس مدار داشته باشد.

بایاس معکوس

در این حالت پین دیود همانند یک خازن عمل میکند. مقدار خازن پین دیود معمولی برابر است با : $C = \frac{\varepsilon A}{w}$ [1]. برای حفظ رفتار خازنی فوق، باید فرکانس سیگنال اعمالی به قطعه از $\frac{1}{2\pi\rho\varepsilon}$ بیشتر باشد (که در آن ρ مقاومت ویژه لایه ذاتی میانی و ε ثابت دی الکتریک سیلیکون است)[6].

خازن معادل پین دیود پیشنهادی در این حالت از ترکیب خازن های ناحیه 1،2 و خازن ناحیه ذاتی میانی بدست می آید که در روابط 5-8 مشخص می شود:

$$C_1 = C_2 = \frac{a}{b} * \frac{\varepsilon A}{w} \quad (5)$$

$$C_i = \frac{\varepsilon A}{w} \quad (6)$$

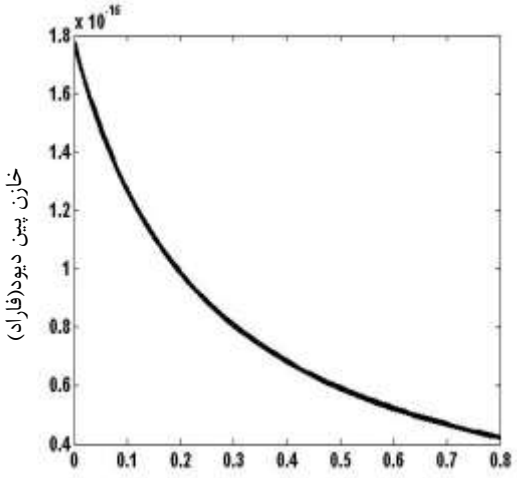
$$C = C_1 + C_2 + C_i \quad (7)$$

$$C = \frac{\frac{\varepsilon A}{w}}{(1+\frac{2b}{a})} \quad (8)$$

ملاحظه می شود که در این حالت خازن نسبت به پین دیود های رایج کوچکتر شده است ولی بازه فرکانسی در بایاس معکوس تغییری نکرده است.

در شکل 4، مقدار خازن پین دیود پیشنهادی در بایاس معکوس، به ازای مقادیر مختلف b نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، مطابق انتظار و طبق روابط5-8، مقدار خازن با افزایش مقدار b کاهش خواهد یافت.

این مساله مزایایی کاربردی را برای ساختار پیشنهادی به همراه خواهد داشت.



شکل 4: نمودار تغییرات خازن پین دیود پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف b.

از مهم ترین کاربردهای پین دیود استفاده در سوییچ ها می باشد. در حالت ایده آل، سوییچ باید دارای مقاومت صفر در حالت وصل و مقاومت بینهایت در حالت قطع باشد. پین دیود پیشنهادی در این زمینه عملکرد مناسب تری نسبت پین دیود رایج از خود نشان می دهد، چرا که با افزایش b مقدار خازن کاهش می یابد (شکل 4) و این کاهش مقدار خازن باعث افزایش امپدانس پین دیود در حالت قطع و نزدیک تر شدن رفتار سوییچ به حالت ایده ال را در پی خواهد داشت .

ولتاژ شکست

در پین دیود پیشنهادی، به دلیل ضخامت موثر بیشتر، مقدار ولتاژ شکست نسبت به حالت معمولی افزایش یافته است. این مساله می تواند در رابطه 9 دیده شود.

$$v_{bd} = \frac{\varepsilon w_{dm}}{2}(\frac{w}{w_{dm}})(2-\frac{w}{w_{dm}}) \quad (9)$$

از این پین دیود می توان در مدولاتورها و دمودلاتورها و ضرب کننده های سیگنال استفاده کرد.

خلاصه

در این مقاله، یک ساختار جدید برای پین دیود معرفی شد که دارای بازه فرکانس کاری بالاتر و کیفیتی بهتر نسبت به پین دیود رایج است. همچنین ولتاژ شکست نسبت به پین دیود معمولی به دلیل افزایش ضخامت و مساحت موثر افزایش یافته است و این ویژگی باعث می شود که بتوان از قطعه در ولتاژ بالاتر نسبت به حالت رایج استفاده کرد. همچنین ساختار پیشنهادی خازن کوچکتری (در بایاس معکوس) نسبت پین دیودهای رایج دارد که آن را برای استفاده در سوییچ ها ایده آل تر می سازد.

مراجع

[1] Zhang, Ying, et al. "The PIN Diode Circuit Designers, Handbook The PIN Diode Circuit Designers, Handbook, 1998." *IEICE transactions on communications* 90.6 (2007): 1467-1473.

[2] Abiri, E., Salehi, M. R., Kohan, S., & Mirzazadeh, M. (2010, August). Multi-application PIN diode. *In 2010 Second Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System* (Vol. 1, pp. 60-62). IEEE.

[3] Chaimool, S., Hongnara, T., Rakluea, C., Akkaraekthalin, P., & Zhao, Y. (2019). Design of a PIN diode-based reconfigurable metasurface antenna for beam switching applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019.

[4] Drozdovskaia, L. (1999, August). A novel low-frequency PIN diode. *In 1999 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (Vol. 2, pp. 592-595)*. IEEE.

[5] Doherty, B., 1986. *PIN Diode Fundamentals*. Microsemi Watertown.

[6] Sun, P., Upadhyaya, P., Wang, L., Jeong, D. H., & Heo, D. (2006, September). High Performance PIN Diode in 0.18-μm SiGe BiCMOS Process for Broadband Monolithic Control Circuits. *In 2006 European Microwave Integrated Circuits Conference* (pp. 149-152). IEEE.