

پیش‌بینی ولتاژ شکست دیود نوری بهمنی با استفاده از شبکه عصبی

محمد سروش

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

چکیده

سیستم انتقال نوری از سه بخش اصلی فرستنده، خط انتقال (فیبرنوری) و گیرنده تشکیل شده است. اولین جزء این گیرنده، آشکارساز نوری است. آشکارساز، تغییرات توان نوری تابیده شده به آن را پس از دریافت، به تغییرات جریان الکتریکی متناظر با آن تبدیل می‌کند. با توجه به این موضوع که آشکارساز نوری اولین بخش از گیرنده نوری است کارکرد این افزاره بطور مستقیم بر دریافت اطلاعات نوری فرستاده شده موثر است. واضح است که شبیه‌سازی و تحلیل این افزاره نقش مهمی در شبیه‌سازی کل گیرنده نوری دارد.

در این مقاله با استفاده از شبکه پرسپترون چندلایه، ولتاژ شکست آشکارساز نوری بهمنی را پیش‌بینی می‌کنیم. عوامل زیادی بر ولتاژ شکست اثر می‌گذارند که مهمترین آنها را به عنوان ورودیهای شبکه در نظر می‌گیریم. این عوامل عبارتند از: عرض (پهنا)، غلظت ناخالصی و نوع موادبکاررفته در نواحی جذب و تکثیر. بنابراین شبکه MLP را با شش نرون در لایه ورودی و یک نرون در لایه خروجی در نظر می‌گیریم.

کلید واژه ها: آشکارساز نوری بهمنی، شبکه‌های عصبی، شکست بهمنی.

پیش‌بینی ولتاژ شکست دیود نوری بهمنی با استفاده از شبکه عصبی

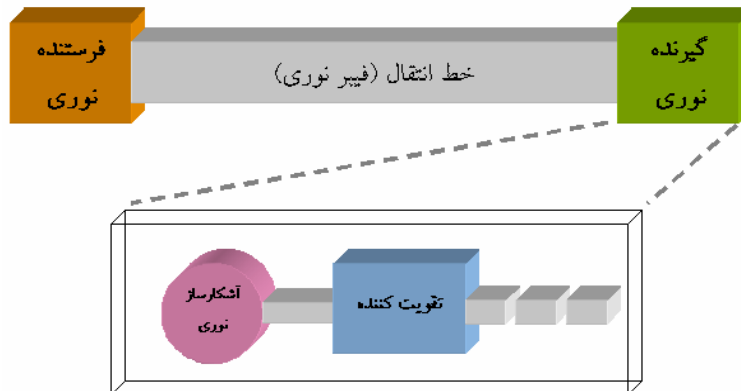
محمد سروش

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

کلید واژه ها: آشکارساز نوری بهمنی، شبکه‌های عصبی، شکست بهمنی.

1- مقدمه

شکل 1 ساختار کلی سیستم انتقال نوری را نشان می‌دهد. این سیستم از سه بخش اصلی فرستنده، خط انتقال (فیبر نوری) و گیرنده تشکیل شده است.



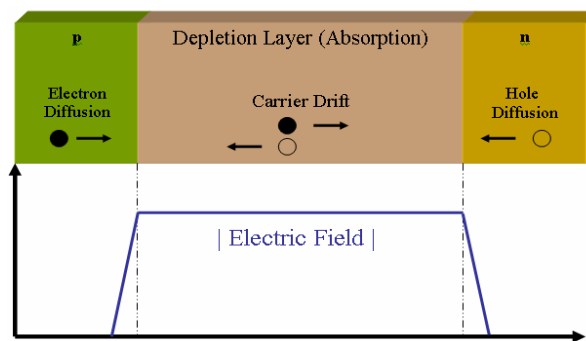
شکل 1: ساختار کلی سیستم انتقال نوری.

در خروجی هر خط انتقال نوری گیرنده‌ای لازم است تا اطلاعات موجود در سیگنال نوری را تفسیر کند. اولین جزء این گیرنده، آشکارساز نوری است. آشکارساز، تغییرات توان نوری تابیده شده به آن را پس از دریافت، به تغییرات جریان الکتریکی متناظر با آن تبدیل می‌کند. چون سیگنال نوری ظاهر شده از انتهای فیبر معمولاً دچار تضعیف و اعوجاج شده است، آشکارساز باید نیازهای عملکردی بسیار زیادی را برآورده سازد. مهمترین این نیازها عبارتند: از پاسخ‌دهی سریع یا حساسیت زیاد در محدوده طول موج گسیل شده از منبع نوری، داشتن

حداقل نویز و پهنای باند کافی برای سرعت مطلوب انتقال اطلاعات [1 و 2]. همچنین آشکارساز نوری باید نسبت به تغییرات درجه حرارت حساس نباشد. با ابعاد فیزیکی فیبر نوری سازگار بوده و دارای قیمت مناسب و طول عمر زیاد باشد.

2- آشکارساز نوری بهمنی

شکل 2 ساختار کلی یک آشکارساز نوری بهمنی را نشان می‌دهد. در این ساختار، نور به ناحیه جذب (ناحیه i) می‌تابد. با جذب فوتونها، حاملهای جدیدی تولید می‌شوند که فتوحفره و فتوالکترون نام دارند. تحت میدان الکتریکی بسیار قوی، فتوالکترونها و فتوحفره‌ها، یونیزاسیون برخوردی می‌شوند و همین امر باعث زیاد شدن تعداد حاملها می‌شود. به عنوان مثال یک الکترون پرنرژی می‌تواند با یک الکترون باند ظرفیت برخورد کند و با انتقال انرژی به آن، باعث تحریک آن الکترون به باند هدایت شود. بنابراین دو الکترون آزاد در باند هدایت و یک حفره آزاد در باند ظرفیت خواهیم داشت.



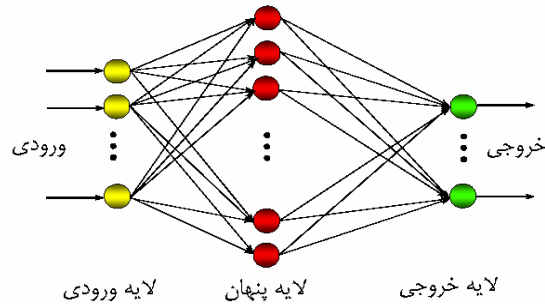
شکل 2: ساختار آشکارساز نوری بهمنی

تحت میدان الکتریکی بسیار قوی، فتوالکترونها و فتوحفره‌ها، یونیزاسیون برخوردی می‌شوند و همین امر باعث زیاد شدن تعداد حاملها می‌شود. بعنوان مثال یک الکترون پرنرژی می‌تواند با یک الکترون باند ظرفیت برخورد کند و با انتقال انرژی به آن، باعث تحریک آن الکترون به باند هدایت شود. بنابراین دو الکترون آزاد در باند هدایت و یک حفره آزاد در باند ظرفیت خواهیم داشت. حاملهای اضافه شده با دریافت بخشی از انرژی برخورد و تحت میدان الکتریکی قوی می‌توانند حاملهای دیگری پدید آورند. افزایش تعداد حامل، باعث بیشتر شدن جریان خروجی و در نتیجه افزایش حساسیت گیرنده می‌شود [2 تا 6].

3- شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

هدف از شبکه‌های عصبی مصنوعی فراهم آوردن مجموعه سخت افزار و نرم افزاری است که بتواند ویژگیهای عمده مغز انسان را در پروسه یادگیری از خود نشان دهد. شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه¹ (MLP) یکی از قدرتمندترین شبکه‌ها جهت ایجاد نگاشت غیرخطی و تقریب‌زنی روابط پیچیده است. شکل 3 ساختار شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه را نشان می‌دهد [7].

این شبکه از یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده است. آموزش این شبکه از نوع آموزش با سرپرست² می‌باشد. به عبارت دیگر برای آموزش شبکه به هر دو بردار ورودی و خروجی نیاز داریم. ابتدا بردار ورودی به شبکه عرضه شده و خروجی متناظر آن محاسبه می‌شود. سپس این خروجی محاسبه شده، با بردار خروجی هدف مقایسه می‌شود و خطای لایه خروجی بدست می‌آید. در مرحله بعد، این خطا به لایه‌های قبلی منتشر می‌شود. میزان تصحیح ضرایب وزنی اتصالات بین نرونی، متناسب با بزرگی این خطا می‌باشد [7].



شکل 3: ساختار شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه.

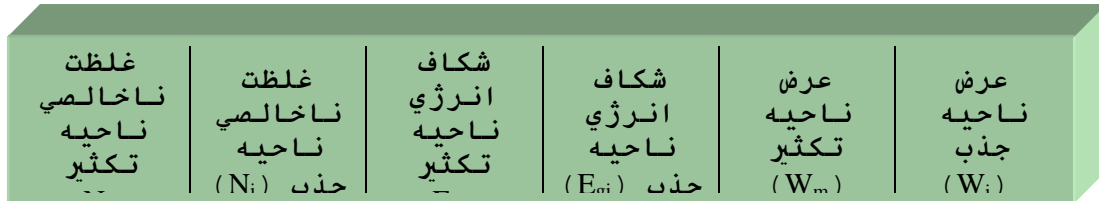
پس از تصحیح ضرایب وزنی، مجدداً بردار ورودی به شبکه عرضه می‌شود و پروسه پیش گفته تا جایی که خطای شبکه به مقدار قابل قبولی برسد ادامه می‌یابد. ورودی هر نرون مجموع وزن‌دار خروجی نرونهای لایه قبلی است. معروفترین توابع محرک عبارتند از: سیگموئید³، تانژانت هیپربولیک (TanH) و تابع خطی.

4- گزینش و دسته‌بندی الگوها

برای تهیه الگوهای شبکه از مجموعه مقالات معتبر علمی در مجلات و کنفرانسهای بین‌المللی استفاده کرده‌ایم [4 تا 29]. به عبارت دیگر، در جمع‌آوری داده‌های شبکه سعی کرده‌ایم از منابعی استفاده کنیم که توسط افراد، گروهها و آزمایشگاههای معتبر ارائه شده‌اند. بدیهی

1. Multi Layer Perceptron (MLP)
1. Supervised Learning
2. Sigmoid

است بهترین داده‌ها مربوط به مقالات معتبر بین‌المللی هستند. برای تعیین قالب کلی الگوها با توجه به سازوکارهای درون افزاره، مهمترین پارامترهای موثر بر ولتاژ شکست را انتخاب می‌کنیم. مهمترین پارامترها عبارتند از: عرض (پهنا)، غلظت ناخالصی و نوع موادبکاررفته در نواحی جذب و تکثیر. بدین ترتیب قالب کلی هر الگو شامل 6 قسمت است. شکل 4 قالب کلی الگوها را نشان می‌دهد.



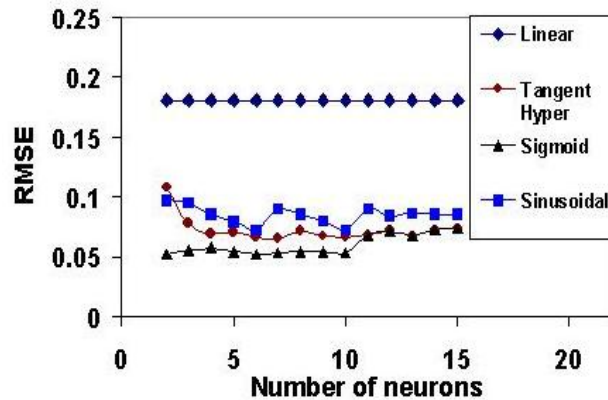
شکل 4: قالب کلی الگوهای شبکه.

ولتاژ شکست به عرض نواحی افزاره وابسته است. بدیهی است هر چه ابعاد یک افزاره بزرگتر باشد مقدار ولتاژ بایاس معکوس بیشتری را می‌تواند تحمل کند. به عبارت دیگر هر چه عرض نواحی درون افزاره آشکارساز نوری بهمنی بزرگتر باشد نواحی تخلیه موجود در سطح مشترک پیوندها نیز می‌تواند بزرگتر شود. این موضوع به منزله آستانه تحمل بیشتر افزاره است. غلظت ناخالصی نواحی جذب و تکثیر عامل مهمی در شدت میدان الکتریکی درون افزاره آشکارساز نوری بهمنی است. هر چه غلظت ناخالصی نیمه‌هادی بیشتر باشد عرض ناحیه تخلیه کمتر می‌شود و شدت میدان الکتریکی پیوند بیشتر می‌شود. قویتر شدن میدان الکتریکی باعث می‌شود که افزاره به پدیده شکست نزدیکتر شود.

5- آموزش شبکه

برای آموزش شبکه از شبکه چندلایه پرسپترون استفاده می‌کنیم. همانطور که پیشتر گفته شد این شبکه یکی از قدرتمندترین شبکه‌هاست. آموزش شبکه دارای دو مرحله است: یافتن معماری بهینه و آموزش. قالب کلی شبکه چندلایه پرسپترون دارای 6 ورودی و یک خروجی است. تعداد 61 الگو برای آموزش و 5 الگو برای آزمون در نظر گرفته می‌شود [4 و 8 و 14 و 16 و 25]. برای استفاده از این شبکه، باید معماری بهینه آن را طراحی کنیم. به عبارت دیگر، نوع توابع محرک لایه‌ها و تعداد تکرار الگوها را به ازای سری آموزش تعیین می‌کنیم. برای یافتن معماری بهینه، آرایش توابع محرک زیر را در چهار حالت نظر می‌گیریم: سیگموئید در تمام لایه‌ها، تانژانت هیپربولیک در تمام لایه‌ها، تابع خطی در تمام لایه‌ها و تابع سینوسی در تمام لایه‌ها.

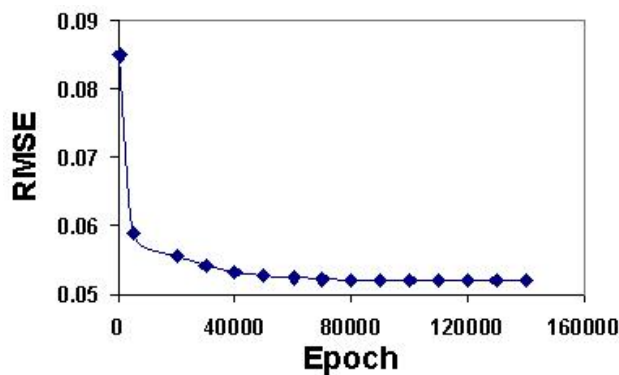
برای هر کدام از حالت‌های چهار گانه پیش گفته به ازای تعداد مختلفی از نرون‌های لایه پنهان، مقدار خطای موثر شبکه را محاسبه می‌کنیم. شکل 5 این موضوع را نشان می‌دهد. تعداد تکرار الگوها را برابر 100000 در نظر گرفته‌ایم. هر چه مقدار خطای موثر کمتر باشد مطلوب است. به عبارت دیگر، کوچکتر شدن خطای موثر شبکه به ازای الگوهای آموزش نشان‌دهنده آموزش بهتر شبکه است.



شکل 5: خطای موثر شبکه به ازای الگوهای آموزش و تعداد تکرار 100000.

همانطور که دیده می‌شود به ازای تعداد 6 نرون در لایه میانی و تابع محرک سیگموئید برای تمام لایه‌ها، خطای آموزش شبکه کمترین مقدار را دارد. بنابراین معماری بهینه شبکه 6-6-1 است یعنی 6 نرون در لایه اول (ورودی)، 6 نرون در لایه دوم (میانی) و یک نرون در لایه سوم (خروجی). تابع سیگموئید نیز به عنوان تابع محرک شبکه انتخاب می‌شود.

برای تکمیل طرح معماری بهینه، باید تعداد تکرار الگوها را نیز بهینه کنیم. بدین منظور با توجه به معماری بهینه پیش گفته، پروسه آموزش را به ازای تعداد تکرارهای مختلف انجام می‌دهیم و خطای آموزش شبکه را محاسبه می‌کنیم. این خطا به ازای سری آموزش بدست آمده است. شکل 6 این خطا را نشان می‌دهد.



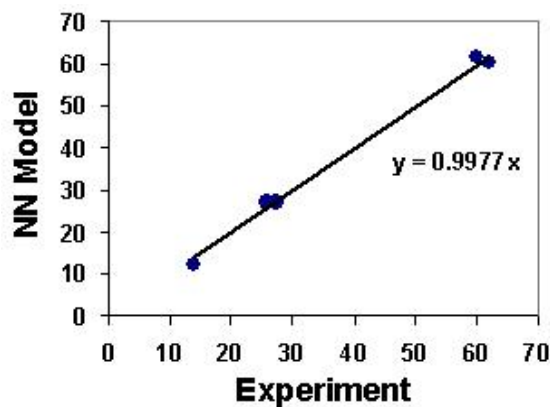
شکل 6: خطای موثر شبکه به ازای الگوهای آموزش و تعداد تکرار 100000.

مشاهده می‌شود که به ازای تعداد تکرار 120000، خطای سری آزمون به کمترین مقدار می‌رسد. در واقع، تعداد تکرار بیش از 120000 باعث یادگیری بهتر شبکه نمی‌شود. اگر تعداد تکرار را بیشتر کنیم ممکن است وزنه‌های شبکه واگرا شوند و خطای شبکه بیشتر شود.

6- ارزیابی مدل

اکنون به معماری بهینه شبکه دست یافته‌ایم. بر اساس مطالب پیش‌گفته، شبکه چند لایه پرسپترون با آرایش 1-6-6 و تابع محرک سیگموئید، به ازای تعداد تکرار 120000 دارای بهترین عملکرد است. برای محک‌زدن شبکه (مدل بدست‌آمده)، به ازای سری آزمون، نتایج حاصل از مدل را با داده‌های عملی موجود در مقالات معتبر علمی مقایسه می‌کنیم.

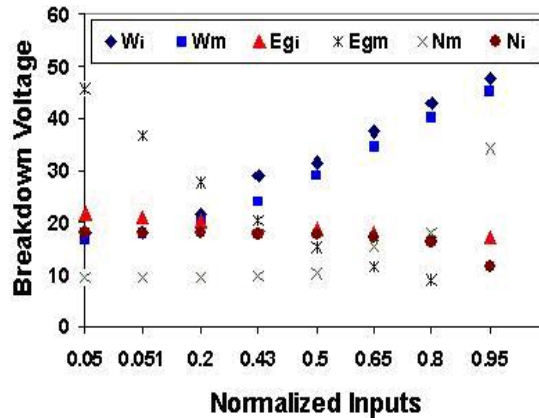
سری آزمون دارای 5 الگو است که از داده‌های مربوط به پنج افزاره آشکارساز نوری بهمنی مختلف بدست آمده است [4 و 8 و 14 و 16 و 25]. برای آزمون شبکه، تکرار مفهومی ندارد یعنی الگوی آزمون را یک‌بار به شبکه عرضه می‌کنیم و نتیجه حاصل از شبکه را با داده عملی متناظر مقایسه می‌کنیم. این کار را برای 5 الگوی پیش‌گفته انجام می‌دهیم. شکل 7 نتایج حاصل از مدل را به ازای داده‌های آزمایشگاهی بدست‌آمده از مقالات نشان می‌دهد.



شکل 7: نتایج بدست‌آمده از مدل برحسب داده‌های عملی به ازای سری آزمون.

هر چه شیب این منحنی به عدد یک نزدیکتر باشد نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل به داده‌های عملی نزدیکتر است. شیب 0/9977 عدد مطلوبی است و تطابق خوب کارکرد مدل با نتایج دیگران را توصیف می‌کند. اکنون که ارزیابی شبکه با موفقیت انجام شد می‌توان تحلیل حساسیت افزاره آشکارساز نوری بهمنی را نیز انجام داد. به عبارت دیگر، میزان تاثیر تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی شبکه بر ولتاژ شکست را بررسی می‌کنیم.

برای تحلیل حساسیت افزاره، یکی از عناصر الگوی ورودی را از 0/05 تا 0/95 مقدار بهنجارش تغییر می‌دهیم و سایر عناصر را ثابت نگه می‌داریم. این پروسه را برای عناصر دیگر آن الگو انجام می‌دهیم. پروسه پیش گفته را برای 5 الگوی سری آزمون تکرار می‌کنیم و میانگین تغییرات را محاسبه می‌کنیم. شکل 8 تحلیل حساسیت افزاره را نشان می‌دهد.



شکل 8: تحلیل حساسیت افزاره آشکارساز نوری بهمنی.

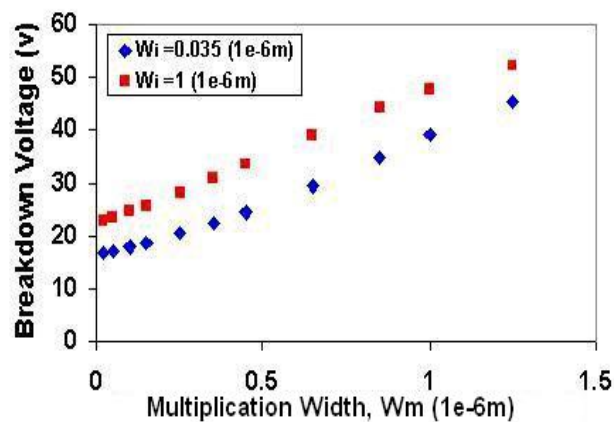
هر چه شیب این منحنی بیشتر باشد بیانگر حساسیت بیشتر ولتاژ شکست افزاره به تغییر پارامترهای ورودی شبکه است. همانگونه که از شکل 8 پیداست ولتاژ شکست به تغییرات عرض نواحی جذب و تکثیر بسیار حساس است. این موضوع را با دو دلیل می‌توان توجیه کرد: اول این که با بزرگتر شدن این نواحی فضای بیشتری در اختیار ناحیه تخلیه پیوندهاست. نواحی تخلیه به ازای ولتاژهای معکوس بزرگتر می‌تواند عریض تر شود.

از طرف دیگر، بزرگتر شدن این نواحی باعث می‌شود که مقدار شدت میدان الکتریکی در این نواحی کمتر شود و به ازای ولتاژهای بزرگتری، شدت میدان الکتریکی آستانه برای شکست افزاره مهیا شود. بدین ترتیب حساسیت زیاد ولتاژ شکست نسبت به تغییر عرض نواحی جذب و تکثیر امری منطقی است و صحت نتیجه مدل اثبات می‌شود.

پس از عرض نواحی، بیشترین حساسیت مربوط به پارامترهای ناحیه تکثیر مانند شکاف انرژی و غلظت ناخالصی است. با توجه به این که بیشترین شدت میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر واقع است لذا حساسیت ولتاژ شکست آشکارساز نوری بهمنی نسبت به پارامترهای این ناحیه قابل پیش بینی است.

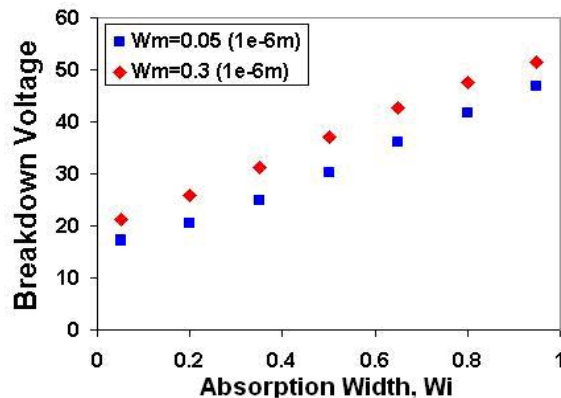
کمترین حساسیت مربوط به غلظت ناخالصی و شکاف انرژی ناحیه جذب است. در این ناحیه یونیزاسیون برخوردی اتفاق نمی‌افتد و شدت میدان الکتریکی نسبت به ناحیه تکثیر کمتر است. بنابراین همانطور که شکل 8 نشان می‌دهد حساسیت خروجی شبکه نسبت به پارامترهای ناحیه جذب کمتر از سایر پارامترهاست.

برای ارائه قابلیت‌های دیگر شبکه و کارکرد مدل، تغییرات ولتاژ شکست افزاره آشکارساز نوری بهمنی نسبت به عرض و غلظت ناخالصی نواحی جذب و تکثیر را نشان می‌دهیم. شکل 9 تغییرات ولتاژ شکست افزاره برحسب عرض ناحیه تکثیر را به ازای دو مقدار مختلف برای عرض ناحیه جذب نشان می‌دهد.



شکل 9: تغییرات ولتاژ شکست افزاره برحسب عرض ناحیه تکثیر به ازای عرضهای مختلف ناحیه جذب.

با افزایش عرض نواحی جذب و تکثیر مقدار ولتاژ شکست افزاره دیود نوری بهمنی افزایش می‌یابد. همانطور که پیشتر گفته شد دلیل این تغییرات کاهش شدت میدان الکتریکی و افزایش فضا برای پیشرفت ناحیه تخلیه پیوندهاست. شکل 10 منحنی تغییرات ولتاژ شکست به ازای تغییرات عرض ناحیه جذب را نشان می‌دهد. این منحنی به ازای دو عرض مختلف ناحیه تکثیر نشان داده شده است.



شکل 10: تغییرات ولتاژ شکست به ازای تغییرات عرض ناحیه جذب و دو مقدار مختلف برای عرض ناحیه تکثیر.

نتیجه گیری

مهمترین نتایج این مقاله عبارتند از:

- با استفاده از شبکه‌های عصبی، ولتاژ شکست افزاره آشکارساز نوری بهمنی را می‌توان با دقت خوبی شبیه‌سازی کرد.
- با استفاده از شبکه عصبی می‌توان اثر پارامترهای مهم افزاره بر تغییرات ولتاژ شکست را پیش‌بینی کرد.
- ولتاژ شکست نسبت به عرض نواحی جذب و تکثیر دیود نوری بهمنی حساسیت زیادی دارد.
- حساسیت ولتاژ شکست نسبت به تغییرات ناحیه شکست بیش از ناحیه جذب است.

منابع

- [1] G. Keiser, Optical Fiber Communication, McGraw-Hill Press, 1985.
- [2] H. S. Nalwa, Photodetectors and Fiber Optics, Academic Press, 2001.
- [3] J. E. Dayhoff, Neural Network Architecture: An Introduction, Van Nostrand Reinhold Press, 1990.
- [4] Y. Kang, P. Mages, and A. R. Glawson, "Fused InGaAs-Si avalanche photodiodes with low-noise performances," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.14, pp. 1593-1595, 2002.
- [5] M. Soroosh, A. Zarifkar, M. Razaghi, and M. K. Moravvej-Farshi, "Separate absorption and multiplication avalanche photodiode (SAM-APD) model for circuit simulation", IEEE Gulf International Conference (GCC), pp. 606-611, Bahrain, 2004.
- [6] A. Zarifkar and M. Soroosh, "Circuit modeling of separate absorption, charge and multiplication avalanche photodiode (SACM-APD)," 6th International Conference on Laser and Fiber-Optical Network Modeling (LFNM), pp. 213-219, Ukraine, 2004.
- [7] M. Soroosh, A. Zarifkar, M. Razaghi, and M. K. Moravvej-Farshi, "A neural network model for determination of excess noise factor for separate absorption and multiplication region avalanche photodiode," International Conference on Optics and Photonics(ICO), pp. 403-404, Japan, 2004.
- [8] G. Hasnain, Wayne G. Bi, S. Song, John T. Anderson, N. Moll, C. Su, James N. Hollenhorst, Nicholas D. Baynes, I. Athroll, Sean Amos, and R. M. Ash, "Buried-mesa avalanche photodiodes," IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, No. 12, pp. 2321-2326, Dec. 1998.
- [9] H. Nie, K. A. Anselm, C. Lenox, P. Yuan, C. Hu, G. Kinsey, B. G. Streetman, and J. C. Campbell, "Resonant-cavity separate absorption, charge and multiplication avalanche photodiodes with high-speed and high gain-bandwidth product," IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 10, No. 3, pp. 409-411, March 1998.
- [10] K. A. Anselm, S. S. Murtaza, C. Hu, H. Nie, B. G. Streetman, and J. C. Campbell, "A resonant-cavity, separate-absorption-and-multiplication, avalanche photodiode with low excess noise factor," IEEE Electron Device Lett., vol. 17, No. 3, pp. 91-93, March 1996.
- [11] Yegao G. Xiao, and M. Jamal Deen, "Modeling of two-dimensional gain profiles for InP-InGaAs avalanche photodiodes with a stochastic approach," IEEE J. Quantum Electron., vol. 35, No. 12, pp. 1853-1862, Dec. 1999.
- [12] Joe N. Haralson, and Kevin F. Brennan, "Novel edge suppression technique for planar avalanche photodiodes," IEEE J. Quantum Electron., vol. 35, No. 12, pp. 1863-1869, Dec. 1999.
- [13] H. Nie, K.A. Anselm, C. Hu, C. Lenox, B.G. Streetman, J. C. Campbell, "High-speed resonant-cavity SAM avalanche photodiodes," Research in University of Texas, 1998.
- [14] J. Wei, J. C. Dries, H. Wang, G. H. Olsen, and S. R. Forrest, "Optimization of double diffused floating guarding ring InGaAs/InP avalanche photodiodes," Research in Princeton University, 2001.
- [15] J. Yao, K. K. Loi, P. Baret, S. Kwan, and M. A. Itzler, "Bandwidth simulation of 10 Gb/s avalanche photodiodes," Research in New Jersey University, 2001.

- [16] C. Hu, K. A. Anselm, B. G. Streetman, and J. C. Campbell, "Excess noise in GaAs avalanche photodiodes with thin multiplication regions," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, No. 7, pp. 1089-1093, July. 1997.
- [17] J. C. Dries, T. Martin, W. Huang, M. J. Lange, and M. J. Cohen, "Two-dimensional InGaAs avalanche photodiode arrays for high sensitivity, high speed imaging," Research in Princeton University, 2002.
- [18] D. Hasko, F. Uherek, and F. Mika, "InGaAs/InP avalanche photodiodes with a thin multiplication layer," Research in the Slovak University of Technology, 2002.
- [19] M. D. A. Mac Bean, N. P. Hewett, M. D. Learmouth, and I. Reid, "Planar InP/InGaAs avalanche photodetector with integrated dielectric wavelength filter," *Electronics Lett.*, vol. 26, No. 12, pp. 804-806, June 1990.
- [20] Y. Liu, S. R. Forrest, J. Hladky, M. J. Lange, G. H. Osen, and D. E. Ackley, "A planar InP/InGaAs avalanche photodiode with floating guard ring and double diffused junction," *IEEE J. Lightwave Tech.*, vol. 10, No. 2, pp. 182-193, Feb. 1992.
- [21] J. Harari, D. Decoster, J. P. Vilcot, B. Kramer, C. Oguey, P. Salsac, and G. Ripoché, "Numerical simulation of avalanche photodiodes with guard ring," *IEE Proceeding-J*, vol. 138, No. 3, pp. 211-217, June 1991.
- [22] M. D. A. Mac Bean, P. M. Rodgers, T. G. Lynch, M. Learmouth, R. H. Walling, and M. J. Robertson, "Planar InP/InGaAs avalanche photodiodes fabricated using Si implantation and two stage atmospheric pressure MOVPE," Research in British Telecom Research Laboratories, 1994.
- [23] C. L. F. Ma, M. J. Deen, and L. E. Tarof, "Multiplication in separate absorption, grading, charge, and multiplication InP-InGaAs avalanche photodiodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, No. 11, pp. 2078-2089, Nov. 1995.
- [24] C. L. F. Ma, M. J. Deen, L. E. Tarof, and J. C. H. Yu, "Temperature dependence of breakdown voltage in separate absorption, grading, charge, and multiplication InP/InGaAs avalanche photodiodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 42, No. 5, pp. 810-818, May 1995.
- [25] S. S. Murtaza, K. A. Anselm, C. Hu, H. Nie, B. G. Streetman, and C. Campbell, "Resonant-cavity enhanced (RCE) separate absorption and multiplication (SAM) avalanche photodetector (APD)," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 7, No. 12, pp. 1486-1488, Dec. 1995.
- [26] C. L. F. Ma, M. J. Deen, and L. E. Tarof, "D.C. and noise characteristics of InP-based avalanche photodiodes for optical communication applications," Research in Simon Fraser University and Bell-Northern Research Ltd., 1993.
- [27] A. Bandyopadhyay, M. J. Deen, L. E. Tarof, and W. Clark, "A simplified approach to time-domain modeling of avalanche photodiodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 34, No. 4, pp. 691-699, Apr. 1998.
- [28] Y. Kang, P. Mages, A. Pauchard, A. R. Clawson, S. S. Lau, Y. H. Lo, and P. K. L. Yu, "Dark current reduction in fused InGaAs/Si avalanche photodiode," Research in University of California, San Diego and Nova Crystals Inc., 2001.
- [29] J. Yu, L. E. Tarof, R. Bruce, D. G. Knight, K. Visvanatha, and T. Baird, "Noise performance of separate absorption, grading, charge and multiplication InP/InGaAs avalanche photodiodes," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 6, No. 5, pp. 632-634, May 1994.