

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه شاهد

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک

**مدل سازی مداری نویز در آشکارسازهای نوری بهمنی**

**محمدحسین اکبری**

استاد راهنما:

**جناب آقای دکتر محسن جلالی**

زمستان ۹۱

## تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای محمدحسین اکبری

را با عنوان مدل‌سازی مداری نویز در آشکارسازهای نوری بهمنی

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما			
۲- استاد مشاور			
۳- استاد مشاور			
۴- استاد ممتحن			
۵- استاد ممتحن			
۶- نماینده گروه			

## چکیده

این پایان نامه ابتدا به بررسی مدل‌های مداری ای می پردازد، که به منظور پیش بینی رفتار آشکارسازهای نوری ارائه شده اند. سپس با بررسی نقاط ضعف و ویژگیهای آنها، یک مدل مداری پیشنهاد می کند که قادر است، جریان خروجی را تحت تاثیر اثر نویز موجود در قطعه، برای آشکارسازهای نوری نازک بخوبی پیش بینی کند. در این مدل سازی با در نظر گرفتن اثر پیشینه یونیزاسیون نفوذپذیر<sup>۱</sup> و طول فضای<sup>۲</sup> مرده سعی در ارائه بیانی درست و جامع از رفتار این دسته از قطعات بوده است. در همین رابطه فضای ناحیه تکثیر تحت تاثیر میدان الکتریکی غیر یکنواخت قرار می گیرد که برای بررسی بهتر، این میدان به شکل پلکانی تقریب زده خواهد شد. این مدل بر اساس محاسبه گین ناحیه تکثیر ابتدا جریان خروجی و فاکتور نویز اضافی را شبیه سازی می کند، سپس نویز قطعه را پیش بینی خواهد کرد. در آخر برای ارائه مدل نهائی، با اضافه کردن نویز محاسبه شده به مدل اولیه رفتار قطعه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. نتایج بدست آمده نشان می دهد، که خروجیهای مدل ارائه شده برای گین، جریان خروجی، فاکتور نویز اضافی و نویز تطبیق مناسبی با نتایج تجربی داشته است.

- 
- 1- Previous Ionization History
  - 2- Dead Length

## فهرست

فصل ۱- مقدمه	۱
۱-۱- اهمیت تحقیق	۲
۱-۲- هدف تحقیق	۳
۱-۳- روش تحقیق	۴
فصل ۲- مدل‌های مداری	۶
۱-۲- مقدمه	۷
۲-۲- مدل‌های مداری مبنی بر معادلات نرخ	۸
۱-۲-۲- مدل مداری برای آشکارسازهای PIN-APD [۱]	۸
۲-۲-۲- مدل مداری برای آشکارسازهای نوری PIN-APD با در نظر گرفتن میدان غیرخطی و اثر فضای	
مرده [۳]	۱۷
۳-۲-۲- مدل مداری برای آشکارسازهای نوری SAGCM-APD [۲]	۲۹
۳-۲-۳- مدل مداری مبنی بر معادلات پیوستگی جریان	۳۸
۱-۳-۲- مدل مداری آشکارساز نوری PIN بوسیله تاثیر زمان گذر [۹]	۳۸
۴-۲- مدل‌های مداری مبنی بر سایر روشهای ارائه شده	۴۳
۱-۴-۲- مدل مداری برای یک SAGCM-APD [۴]	۴۳
۲-۴-۲- مدل مداری یک WG-SACM-APD [۶]	۴۹
۵-۲- مدل مداری نوین	۵۶
۱-۵-۲- مدل مداری نوین برای SAM-APD [۱۱]	۵۶
فصل ۳- مدل سازی مداری	۶۲
۱-۳- مقدمه	۶۳
۱-۱-۳- میدان الکتریکی [۳]	۶۴
۲-۳- مدل مداری وابسته به مکان برای محاسبه گین ناحیه تکثیر APD	۶۷
۱-۲-۳- مدل سازی گین تکثیر	۶۷
۲-۲-۳- مدل نهائی جریان خروجی	۷۱

۷۲	۳-۳- مدل سازی فاکتور نويز اضافی
۷۲	۳-۳-۱- تئوری میدان محلی [۱۲]
۷۴	۳-۳-۲- مدل سازی مدارى
۸۲	۳-۴- مدل سازی مدارى نويز
۸۵	فصل ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۶	۴-۱- مقدمه
۸۷	۴-۲- تئوری پیشینه وابستگی [۱۲ و ۱۶]
۸۸	۴-۳- میدان مؤثر
۹۰	۴-۴- نتایج
۱۰۰	۴-۵- پیشنهادات
۹۸	فهرست مراجع
۱۰۰	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۱۰۱	واژه نامه انگلیسی به فارسی

## فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ بلوک دیاگرام یک گیرنده نوری .....	۳
شکل ۱-۲ یک PIN-APD تحت تاثیر میدان الکتریکی یکنواخت.....	۹
شکل ۲-۲ مدل مداری یک PIN-APD.....	۱۶
شکل ۳-۲ نمای یک APD، مشخصه میدان الکتریکی و تقریب پلکانی برای مدل میدان الکتریکی .....	۱۷
شکل ۴-۲ مدل مداری یک APD.....	۲۶
شکل ۵-۲ نمای یک SAGCM-APD.....	۲۹
شکل ۶-۲ مدل مداری یک SAGCM-APD.....	۳۵
شکل ۷-۲ طرحی ساده از آشکار ساز نوری PIN تحت تاثیر میدان یکنواخت.....	۳۸
شکل ۸-۲ مدل مداری PIN بر اساس معادلات پیوستگی.....	۴۰
شکل ۹-۲ ساختار لایه ای یک InAlAs SACM-APD.....	۴۴
شکل ۱۰-۲ نمای یک SACM-APD.....	۴۹
شکل ۱۱-۲ مدل مداری یک SACM-APD.....	۵۴
شکل ۱۲-۲ مدل ساده ای از یک SAM-APD.....	۵۷
شکل ۱۳-۲ مدل مداری نوین برای یک SAM-APD.....	۶۰
شکل ۱-۳ الگوی ساختاری و میدان الکتریکی غیر یکنواخت یک PIN-APD.....	۶۴
شکل ۲-۳ مدل مداری برای محاسبه معادلات صورت رابطه ۵-۳ .....	۶۷
شکل ۳-۳ مدل مداری برای محاسبه معادلات مخرج رابطه ۵-۳.....	۶۸
شکل ۴-۳ نمای یک VCR.....	۷۰
شکل ۵-۳ مدل جریان خروجی در حضور پارامترهای پارازیتی.....	۷۱
شکل ۶-۳ مدل مداری برای محاسبه معادلات موجود در صورت رابطه گین.....	۷۶
شکل ۷-۳ مدل مداری برای شبیه سازی عبارت $I_Q$ .....	۷۹
شکل ۸-۳ مدل مداری برای شبیه سازی عبارت $I_T$ .....	۸۱
شکل ۹-۳ مدل نهائی برای پیش بینی فاکتور نوین اضافی.....	۸۲

- شکل ۳-۱۰ مدل مداری برای شبیه سازی  $M(\omega)$  و مدل جریان خروجی با در نظر گرفتن اثر نویز ..... ۸۳
- شکل ۴-۱ نمودار گین تکثیر برای یک Homojunction GaAs PIN-APD ..... ۹۰
- شکل ۴-۲ نمودار جریان نوری یک InAlAs PIN-APD ..... ۹۱
- شکل ۴-۳ پاسخ فرکانسی برای یک پالس ۱۰ ps ..... ۹۳
- شکل ۴-۴ نمودار FM برای ماده GaAs ..... ۹۴
- شکل ۴-۵ نمودار FM برای ماده InP ..... ۹۴
- شکل ۴-۶ نمودار FM برای ماده AlGaAs ..... ۹۷
- شکل ۴-۷ نمودار FM برای ماده InAlAs ..... **Error! Bookmark not defined.**
- شکل ۴-۸ نمودار چگالی توان طیف برای ماده GaAs ..... ۹۸
- شکل ۴-۹ نمودار SNR برای یک PIN-APD با ضخامتهای متفاوت ناحیه تکثیر ..... ۹۶



## فهرست جدولها

صفحه

عنوان

---

جدول ۱-۴ پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی ..... ۹۳

## فصل ۱ - مقدمه

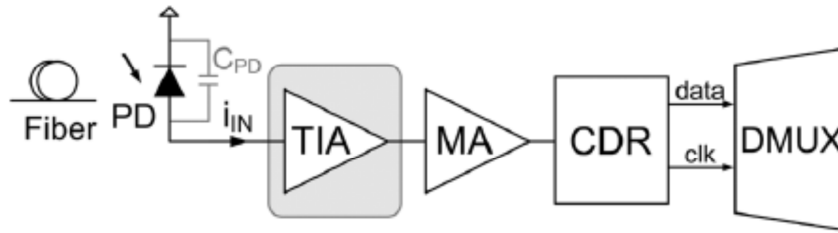
## ۱-۱- اهمیت تحقیق

با ورود نور به گرایشها و شاخه های موجود در حوزه الکترونیک، نگاهی نو در طراحی سیستمهای الکترونیکی شکل گرفته است. ویژگیهای اصلی این پدیده، که از جمله آن می توان به پهنای باند بالای آن در فیبر نوری و تضعیف کم امواج در انتقال اطلاعات، اشاره کرد، در گام اول، حوزه ارتباطات را تحت تاثیر قرار داده، بنحویکه دستخوش تغییرات گسترده ای قرار گرفته است. مزیت بعدی ضریب امنیت انتقال اطلاعات است، اما نکته حائز اهمیت اشاره به این موضوع است، که نور تحت تاثیر تداخل امواج الکترومغناطیسی قرار نمی گیرد، و دخالتی هم در انجام این پدیده ندارد.

با نگاهی گذرا به برنامه های پیشرو در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، و با توجه به طرحهای اجرا شده و جاری کشور، در حوزه مخابرات، اهمیت روز افزون جایگاه الکترونیک نوری در نسل جدید ارتباطات مشخص خواهد شد. که از نمونه های بارز آن می توان به توسعه شبکه فیبر نوری اشاره کرد.

همان طور که عنوان شد، یکی از زمینهایی که در آن الکترونیک نوری نفوذ زیادی داشته است بحث ارتباطات نوری است، به هر ترتیب زمانیکه صحبتی از یک رشته جدید به میان می آید، جدا از شرایط و ضوابط حاکم بر موضوع، باید به ابزار و ادوات موجود، برای استفاده مناسب از این رشته جدید توجه ویژه ای داشت. یکی از این ادوات پر کاربرد در بحث الکترونیک نوری، آشکارسازهای نوری PIN و APD هستند.

با توجه به ویژگی اصلی آشکار سازهای نوری، که در نقاط ابتدایی خطوط گیرنده های نوری قرار می گیرند، و با فیبرهای نوری کوپل می شوند، حساسیت روی این قطعه در مخابرات نوری قابل توجه خواهد بود. شکل ۱-۱ بلوک دیاگرام یک گیرنده نوری را نشان می دهد، که در اطلاعات منتقل شده از فیبر نوری بوسیله یک آشکار ساز نوری، نمایان می شود. آشکار ساز این اطلاعات را به جریان تبدیل می کند، این جریان بوسیله یک  $TIA^1$  تبدیل به ولتاژ شده و در نهایت پس از رمز گشایی به مجموعه اطلاعات قابل دسترسی تبدیل خواهد شد.



شکل ۱-۱ بلوک دیاگرام یک گیرنده نوری

چگونگی عملکرد این قطعات، بوسیله مدل مداری<sup>۱</sup> تشریح و بررسی می شود. لازم به ذکر است برای طراحی این مدل‌های چند روش متداول وجود دارد، که در آنها بر اساس معادلات نرخ حامل‌های اقلیت [۱-۳] و یا معادلات پیوستگی جریان [۹ و ۱۰]، پس از بسط و استخراج معادلاتی که بتواند رفتار قطعه را به درستی تشریح و پیش بینی کند، روابط به دست آمده را به مدل‌های مداری تبدیل می کنند.

اما برای پیش بینی درست رفتار قطعه لازم است تا سایر پدیده های تاثیر گذار بر عملکرد قطعه را نیز در نظر بگیریم. از جمله این پدیده ها می توان به نویز اشاره کرد. نویز در واقع یک فرآیند تصادفی است که می تواند کمترین سطح سیگنال در یک سیستم مداری را تحت تاثیر قرار دهد. امروزه نویز بسیاری از محققان را درگیر خود کرده است زیرا می تواند در مسائلی چون اتلاف توان، سرعت و ... نقش تعیین کننده ای داشته باشد.

در آشکارسازهای نوری نویز در چند نوع دسته بندی می شود که از جمله این موارد می توان به نویز ضربه ای، نویز حرارتی و نویز ناشی از ترکیب و باز ترکیب حاملها اشاره کرد.

## ۱-۲- هدف تحقیق

مطابق آنچه در بالا ذکر شد، ارائه مدل مداری دقیق، رفتار فیزیکی قطعه در طبیعت را پیش بینی می کند، و عکس العمل قطعه را نسبت به تحریک آن بیان می کند. تا حدی که هرچه مدل ارائه شده، پیش بینی دقیق تری از عملکرد قطعه داشته باشد، درک درست تری از طراحی مدارهای همسو با این قطعات وجود خواهد داشت.

با بررسی دقیقی که روی مدل‌های مداری که تاکنون ارائه شده است، انجام گرفت [۱۰-۱]. تنوع زیادی در مدل سازی مداری مشاهده شد. اما تمامی این مدل‌ها نقصی واحد در ارائه نمونه خود داشتند. اما ریشه این ضعف در ارائه این مدل‌ها نادیده گرفتن اثر نویز قطعه است. زیرا با کوچکتر شدن ناحیه جذب نور، اثرات جدیدی در قطعه به وجود می آید، که می توان از آن به عنوان اثر نویز قطعه یاد کرد.

هدف اصلی در انجام این تحقیق، توسعه ایده هایی است که تا کنون بر مبنای مدل سازی مداری جهت تجزیه و تحلیل هرچه بهتر ادوات نوری ارائه شده است. قابل ذکر است ارائه مدل‌هایی جدید و یا کامل کردن آن، برای بررسی هر چه بهتر ادوات، زمینه‌ای مناسب را برای ارتقا کیفیت نتایج شبیه سازی و نزدیک شدن آن به اطلاعات حقیقی فراهم می کند، که یکی از اهداف اصلی در مراکز تحقیقاتی به شمار می رود.

با عنایت به این موضوع که نتایج پژوهشی که با موضوع مورد نظر ارائه می شود، مناسب برای مراکز تحقیقاتی از جمله مراکز تحقیقاتی وابسته به مخابرات می باشد، که نیازی مبرم به مدل سازی فرآیندهای تصادفی موجود در محیط از جمله نویز را احساس می کنند و توسعه روز افزون بسترهای مخابرات نوری به خاطر مزایای منحصر به فرد آن، این نتایج می تواند زمینه‌ای مناسب برای شبیه سازی هرچه بهتر قطعات نوری طراحی شده، برای طراحان فراهم کند.

### ۱-۳- روش تحقیق

روند انجام تحقیق در چهار بخش کلی شکل گرفته است، در مرحله اول، مطالب و اطلاعات مورد نیاز جهت شروع پروژه، جمع آوری شده است. برای انجام این کار تقریباً تمامی مدل‌های معتبری که تا کنون ارائه شده بود، شناسایی شد. سپس در مرحله بعد این اطلاعات، دسته بندی شده و براساس روشی که بر مبنای آن، مدل سازی مداری صورت گرفته بود، طبقه بندی شدند. بعد از آن مدلی که انعطاف کافی برای اضافه کردن اثر نویز را دارا بود، انتخاب شد. سپس مدل مداری انتخاب شده، بوسیله نرم افزار *ADS* شبیه سازی، و نتایج آن با نتایج ارائه شده در مقاله مرجع مقایسه شد. پس از تأیید صحت درستی این اطلاعات، تحقیق وارد فاز سوم خود شد. در این قسمت مدل سازی نویز انجام گرفت. برای انجام آن ابتدا الگوهای ریاضی نویز شناسایی شد. بعد از بررسی های تکمیلی، این معادلات، به یک مدل مداری تبدیل، و در نهایت به مدل اولیه اضافه شد. سرانجام در مرحله آخر، مدل توسعه یافته با اعمال نویز دوباره شبیه سازی شد، و مقایسه رفتار فیزیکی مدل، با نتایج تجربی، هدف اصلی

فعالیت‌های پیشرو قرار گرفت. در این مرحله، برای تأیید صحت کار انجام شده، نتایج حاصله، با اطلاعات مقاله‌هایی که در آن گزارشی از مشخصه‌های فیزیکی مواد ارائه می‌کنند، مقایسه شد.

## فصل ۲ - مدل‌های مداری

## ۲-۱- مقدمه

با توجه به کاربردهای روز افزون آشکارسازهای نوری تاکنون مدل‌های متنوعی برای بیان رفتار این قطعات ارائه شده است. در هر یک از این مدل‌ها، روش‌های متنوعی برای پیاده سازی ویژگی‌های قطعه وجود دارد. دو روش معمول برای مدل سازی مداری این قطعات وجود دارد، که در یکی معادلات نرخ [۱-۳] و در دیگری معادلات پیوستگی جریان [۹ و ۱۰] به کار گرفته شده است.

نمونه های متنوعی وجود دارند که در آن با استفاده از معادلات نرخ، مدل سازی شکل می گیرد، در این مدل‌ها با تبدیل معادلات نرخ به المانهای مداری اولین نمونه ها از این دست مدل سازی بیان می شود. [۱-۳] برای توسعه مدل‌های اولیه، سعی شد تا تحلیل پاسخ فرکانسی و زمانی به این مدل‌ها اضافه شوند [۳-۸]. با افزوده شدن اثر فضای مرده به مدل های ارائه شده فضای جدیدی در تحلیل این قطعات بوجود آمده، که نتایج شبیه سازیها در هر مرحله را به واقعیت نزدیکتر می کند.

از دیگر شاخصه هایی که موجب افزایش کیفیت مدل‌ها شده، مدل سازی قطعاتی است، که برای کم کردن برخی از پارامترهای مخرب در خروجی، از جمله اثر به دام افتادگی، از چند نوع ماده مختلف در ساخت آشکارسازها بصورت طبقه بندی شده استفاده می کنند. [۲ و ۴-۷] در این نمونه ها سعی در تحلیل جامع حوزه فرکانس این قطعات شده است. در آخرین نمونه های ارائه شده محققان سعی در بیان جامعتری از مدل‌های مداری دارند تا با در نظر گرفتن اثر میدان غیرخطی برای مدل‌ها، آنها را کاملتر کنند. [۲ و ۳]

در دیگر نمونه از معادلات پیوستگی جریان استفاده می شود تا اثر زمان گذر به این مدل‌ها افزوده شود. [۹ و ۱۰] اما برای تحلیل نویز، تنها یک مدل ارائه شده است [۱۱]. و در سایر مدل‌ها تاکنون توجه جدی به این مسئله وجود نداشته است. در این بخش ما به تشریح نمونه هایی از روش‌های متداول، در مدل سازی مداری آشکارسازهای نوری می پردازیم، و در آخر مدل مداری ای که برای نویز ارائه شده را ارزیابی می کنیم.



## ۲-۲- مدلهای مداری مبنی بر معادلات نرخ

### ۲-۲-۱- مدل مداری برای آشکارسازهای PIN-APD [۱]

این مدل یکی از اولین مدل‌هایی است که برای بررسی آشکارسازهای شکست بهمنی PIN ارائه شده، و نمونه بسیار مناسبی برای پیش بینی جریان خروجی این دسته از آشکارسازها است. به همین علت چگونگی انجام فرآیند مدل سازی آن در این قسمت مورد بررسی قرار می گیرد.

برای شروع الگوی ساختاری یک PIN-APD در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است. برای سهولت در روند کار، جذب نور از سمت  $n$  مورد بررسی قرار می گیرد. و معادلاتی که برای جذب نور در طرف  $p$  نوشته می شود، نیازمند تغییرات کوچکی است. برای ساختار PIN، برای این مدل می توان این فرضیه ها را در نظر گرفت:

۱- عرض ناحیه تخلیه در سمت  $n$  و  $p$  بسیار کوچکتر از عرض ناحیه  $i$  است ( بنابراین می توان از آن صرف نظر کرد)

۲- میدان الکتریکی در ناحیه  $i$  یکنواخت، و در طرف  $n$  و  $p$  برابر صفر خواهد بود.

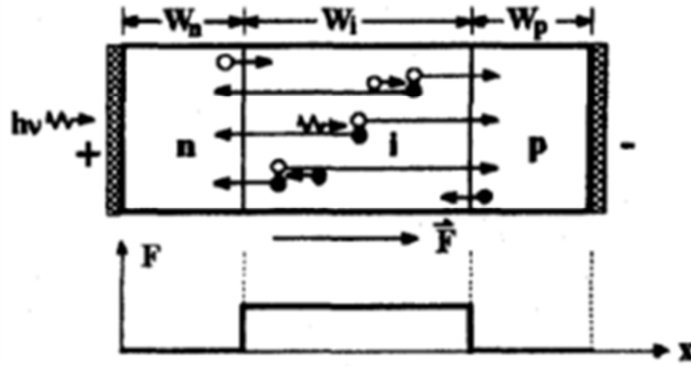
برای قطعات واقعی ناحیه  $i$  معمولاً دارای ناخالصی است، چون حتی اگر تزریق خود خواسته ای هم وجود نداشته باشد، مقدار مشخصی از ناخالصی در ناحیه  $i$  وجود خواهد داشت. بنابراین ۲ فرض بالا، فرضیات محکمی نیستند. اما تا زمانیکه چگالی ناخالصی در ناحیه  $i$  بسیار کوچکتر از دو ناحیه دیگر باشد، مفروضات بالا صادق خواهد بود. جریان در مرز دو ناحیه  $n$  و  $i$  شامل دو قسمت است:

۱. جریان نفوذی حاصل از حاملهای اقلیت در ناحیه  $n$

۲. جریان رانشی الکترونها در ناحیه  $i$

الکترونهای ناحیه  $i$  از یونیزاسیون ضربه ای حفره ها و الکترونها، فوتونها و نفوذ حاملهای اقلیت در ناحیه  $p$  حاصل می شوند.

معادلات نرخ در بایاس معکوس برای ساختارهای PIN را می توان بدین شکل نوشت:



شکل ۱-۲

یک PIN-APD تحت تاثیر میدان الکتریکی یکنواخت

برای ناحیه  $n$ :

$$\frac{dP_n}{dt} = P_G - \frac{P_n}{\tau_p} - \frac{I_p}{q} \quad 1-2$$

برای ناحیه  $p$ :

$$\frac{dN_p}{dt} = N_G - \frac{N_p}{\tau_n} - \frac{I_n}{q} \quad 2-2$$

برای ناحیه  $i$ :

۳-۲

$$\frac{dN_i}{dt} = N_{Gi} + v_n \zeta_n N_i + v_p \zeta_p P_i - \frac{N_i}{\tau_{nr}} - \frac{N_i}{\tau_{nt}} + \frac{I_n}{q}$$

۴-۲

$$\frac{dP_i}{dt} = P_{Gi} + v_n \zeta_n N_i + v_p \zeta_p P_i - \frac{P_i}{\tau_{pr}} - \frac{P_i}{\tau_{pt}} + \frac{I_p}{q}$$

$N_p$  و  $P_n$  مجموع الکترونها و حفره های مازاد، به ترتیب در نواحی  $p$  و  $n$  می باشند.  $N_i$  و  $P_i$  هم مجموع

کل الکترونها و حفره های اضافی در ناحیه  $i$  هستند.  $q$  بار الکتریکی،  $\tau_p$  و  $\tau_n$  زمان حضور الکترونها و حفره ها در

نواحی  $n$  و  $p$ ،  $\tau_{nr}$  و  $\tau_{pr}$  زمان باز ترکیب الکترونها و حفره ها،  $\tau_{nt}$  و  $\tau_{pt}$  زمان گذر از ناحیه  $i$ ،  $P_G$  و  $N_G$  نرخ تولید جفت الکترون - حفره ها در ناحیه  $n$  و  $p$  بوسیله نور،  $N_{Gi}(P_{Gi})$  نرخ تولید در ناحیه  $i$ ،  $I_p$  و  $I_n$  جریان نفوذی الکترونها و حفره در نواحی  $n$  و  $p$ ،  $v_n$  و  $v_p$  سرعت رانش الکترونها و حفره ها در ناحیه  $i$ ،  $\zeta_n$  و  $\zeta_p$  نرخ یونیزاسیون الکترونها و حفره ها در ناحیه  $i$  در نظر گرفته می شود.

اگر میدان الکتریکی در ناحیه شکست غیر یکنواخت باشد  $v_n, v_p, \zeta_n$  و  $\zeta_p$  همگی تابعی پیچیده هستند، و معادلات بهره شکست را در معادله ۲-۳ و معادله ۲-۴ نمی توان به راحتی نوشت.

تحت تاثیر میدان خنثی،  $P_i = N_i$  صادق خواهد بود. می توان از معادله ۲-۴ صرف نظر کرد و برای معادله

۲-۳ می توان نوشت :

۲-۵

$$\frac{dN_i}{dt} = N_{Gi} + v_n \zeta_n N_i + v_p \zeta_p N_i - \frac{N_i}{\tau_{nr}} - \frac{N_i}{\tau_{nt}} + \frac{I_n}{q}$$

چند رابطه مهم دیگر بدین ترتیب نوشته می شوند :

$$P_G = \frac{P_{in}(1-R)}{hv} [1 - \exp(-\alpha_n \cdot W_n)] \quad ۲-۶$$

$$N_G = \frac{P_{in}(1-R)}{hv} [\exp(-\alpha_n \cdot W_n + \alpha_i \cdot W_i)][1 - \exp(-\alpha_p \cdot W_p)] \quad ۲-۷$$

$$N_{Gi} = \frac{P_{in}(1-R)}{hv} [\exp(-\alpha_n \cdot W_n)][1 - \exp(-\alpha_i \cdot W_i)] \quad ۲-۸$$

$$\tau_{nt} = \frac{W_i}{v_n} \quad ۲-۹$$

$$\tau_{np} = \frac{W_i}{v_p} \quad ۲-۱۰$$

در این قسمت  $P_{in}$  بیانگر توان نور،  $R$  انعکاس در ناحیه  $n$ ،  $hv$  نمایانگر انرژی فوتون،  $\alpha_n$ ،  $\alpha_i$  و  $\alpha_p$  به

ترتیب ضرایب جذب در نواحی  $n$ ،  $i$  و  $p$  می باشند. همچنین پهنای نواحی  $n$ ،  $i$  و  $p$  به ترتیب با  $W_n$ ،  $W_i$  و

$W_p$  تعریف می شوند.

وابستگی سرعت رانش الکترونها و حفره ها، روی میدان الکتریکی، برای مواد مختلف متفاوت است. برای نمونه GaAs، InP، InGaAs و InGaAsP و سایر ترکیبات ۳ تا ۴ عنصری، روابطی تجربی به شرح زیر قابل بیان است:

۱۱-۲

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

۱۲-۲

$$v_n(F) = \frac{\mu_p F}{1 + \frac{\mu_p F}{v_{sp}}}$$

در روابط بالا  $F$  میدان الکتریکی در ناحیه  $i$ ، برابر با  $F = \frac{V_J + V_{BI}}{W_i}$  است.  $V_J$  ولتاژ اعمالی،  $V_{BI}$  ولتاژ داخلی،  $\mu_n$  و  $\mu_p$  قابلیت تحرک الکترونها و حفره ها،  $v_{sn}$  و  $v_{sp}$  سرعت رانش الکترون و حفره های اشباع در ناحیه  $i$  تعریف می شوند.

روابطی تجربی مبتنی بر نرخ یونیزاسیون ضربه ای الکترونها و حفره ها، روی میدان الکتریکی بدین صورت نوشته می شود:

۱۳-۲

$$\zeta_n = a_n \exp\left[-\left(\frac{b_n}{F}\right)^{c_n}\right]$$

۱۴-۲

$$\zeta_p = a_p \exp\left[-\left(\frac{b_p}{F}\right)^{c_p}\right]$$

در روابط بالا  $a_p$ ،  $b_p$ ،  $c_p$ ،  $a_n$ ،  $b_n$ ،  $c_n$  ثابت هستند، و از نتایج آزمایشات تجربی احراز می شوند.