

دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک
(گرایش فوتونیک)

بررسی تحلیلی پاسخ آشکار ساز نوری نسبت به پالسهای تابیده شده

بر سطح آن

از:

تهمینه محمد علی زاده

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا مشایخی

اسفند ۱۳۸۹

به نام خدا

تقديم

به

پدر و مادر عزيزم

و

محمد رضا

تقدیر و تشکر

توفیق دادار بزرگ اگر نمی بود، این کار رنگ بودن نمی گرفت. او را به سبب این توفیق و همه توفیق ها شکر می نهم. بدون ابراز سپاس از تمام کسانی که مرا یاری نمودند نیز نمی توان بر این سطور نقطه پایان گذاشت. از پدر و مادر عزیزم به پاس گرمای امیدبخش وجودشان که در سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، سپاس بی کران دارم. از استاد راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر حمید رضا مشایخی، که همواره با راهنمایی های ارزشمندشان مشوقم بودند و همچنین با زحمات بی دریغشان در تمام مراحل تدوین این پایان نامه راهگشای اینجانب بوده اند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. مراتب قدردانی خود را از داوران محترم این پایان نامه، جناب آقای دکتر سید محمد روضاتی و جناب آقای دکتر سعید باطبی و نماینده محترم تحصیلات تکمیلی، جناب آقای دکتر فرجانی شایسته، اعلام می کنم. از خواهر و برادرم به خاطر کمک های فکری و دلگرمی هایشان بسیار سپاسگزارم و در پایان از دوستان عزیزم، خانم ها حمیده افتخاری، سحر حسین زاده، عاقله مخلص گرامی و سایر دوستانم که یاورم بودند، بسیار سپاسگزارم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ح.....	فهرست جدول‌ها
خ.....	فهرست شکل‌ها
ز.....	چکیده فارسی
ژ.....	چکیده انگلیسی
	فصل اول: مقدمه
۱.....	۱-۱ مقدمه
	فصل دوم: مروری بر خواص نیمه رساناها
۸.....	۱-۲ مقدمه
۸.....	۲-۲ مواد نیمه رسانا
۹.....	۳-۲ ساختار بلوری

۱۰	۲-۴ پیوند های ظرفیت
۱۱	۲-۵ نوار های انرژی
۱۴	۲-۶ نیمه رسانا های مستقیم و غیر مستقیم
۱۴	۲-۷ حامل ها در نیمه رسانا
۱۴	۲-۷-۱ نیمه رسانای ذاتی
۱۵	۲-۷-۲ نیمه رسانای غیر ذاتی
۱۶	۲-۸ چگالی حامل ها
۱۹	۲-۹ پدیده های انتقال حامل ها
۲۰	۲-۱۰ فرایند های تولید و باز ترکیب
۲۲	۲-۱۰-۱ باز ترکیب به کمک دام اندازی
۲۳	۲-۱۰-۲ باز ترکیب سطحی
۲۳	۲-۱۱ پیوندگاه $p-n$
۲۴	۲-۱۱-۱ ساخت پیوند های $p-n$
۲۵	۲-۱۱-۲ پیوند $p-n$ در حالت تعادل

۲-۱۱-۳ بایاس مستقیم و معکوس پیوند ها ۲۷

فصل سوم: آشنایی با گیرنده های نوری و چگونگی عملکرد آنها

۳-۱ مقدمه ۳۱

۳-۲ مفاهیم اساسی آشکار ساز نوری ۳۱

۳-۲-۱ پاسخ دهی آشکار ساز نوری ۳۱

۳-۲-۲ پهنای باند ۳۳

۳-۳ آشکار سازهای نوری معمول ۳۶

۳-۳-۱ نوررسانا ها ۳۶

۳-۳-۲ دیود های نوری $p-n$ ۳۷

۳-۳-۳ دیود نوری $p-i-n$ ۴۰

۳-۳-۴ دیود نوری بهمنی ۴۳

۳-۴ آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز (MSM) ۴۶

۳-۴-۱ عملکرد MSM PD ۵۰

فصل چهارم: بررسی رفتار آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز در یک بعد در هر دو حالت پایا و دینامیک

۴-۱ مقدمه ۵۵

۵۶	۲-۴ مدل آشکار ساز نوری MSM
۵۸	۳-۴ بررسی رفتار جواب حالت پایا
۵۸	۱-۳-۴ جواب حالت پایا معادله پیوستگی
۶۳	۲-۳-۴ مشخصه I-V حالت پایا
۶۹	۴-۴ بررسی رفتار زمانی
۶۹	۱-۴-۴ جواب وابسته به زمان معادله پیوستگی
۷۳	۲-۴-۴ ثابت زمانی پخش τ_{diff}
۷۵	۳-۴-۴ پاسخ پالس کوتاه
۸۲	۴-۴ بررسی رفتار زمانی پالس گوسی
فصل پنجم : بحث و نتیجه گیری	
۸۸	۳-۵ نتیجه گیری
۸۹	۶-۴ پیشنهاد برای ادامه‌ی کار
۹۰	فهرست منابع

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۱-۱: پارامترهای توصیف کننده قطعه‌ی GaAs ۶۲

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: سیستم کلی مخابرات نوری	۲
شکل ۱-۲: ساختار بلوری زینک-بلند، متشکل از دو ساختار fcc که به اندازه یک چهارم قطر اصلی در یکدیگر فرو رفته اند.	۱۰
شکل ۲-۲: (a) ساختار نوار انرژی Si و (b) ساختار نوار انرژی GaAs، علامت (+) حفره‌ها در نوار ظرفیت و علامت (-) الکترون‌ها در نوار رسانش را نشان می‌دهد. E_g انرژی گاف نواری است.	۱۳
شکل ۲-۳: نمودار نوار انرژی، چگالی حالت‌ها، تابع توزیع فرمی-دیراک و غلظت حاملها، را برای نیمه رساناهای	
(a) ذاتی (b) نوع-n (c) نوع-p، در تعادل گرمایی نشان می‌دهد.	۱۸
شکل ۲-۴: مکانیسم‌های بازترکیب حامل‌ها در نیمه رساناها	۲۱
شکل ۲-۵: (a) بایاس مستقیم (b) بایاس معکوس	۲۸
شکل ۳-۱: قطعه‌ی نیمه رسانا به صورت آشکار ساز نوری به کار می‌رود.	۳۲

- شکل ۳-۲: (a) قطعه‌ی نوررسانا که شامل نیمه رسانایی با دو اتصال اهمی است. (b) شکل شامل اتصالات انگشتی با گام کوچک است. ۳۶.....
- شکل ۳-۳: (a) دیود $p-n$ تحت بایاس معکوس. (b) تغییر توان نوری در داخل دیود نوری (c) نمودار نوار انرژی، حرکت حامل‌ها را از طریق فرایند پخش و سوق نشان می‌دهد. ۳۷.....
- شکل ۳-۴: پاسخ دیود نوری $p-n$ به پالس نوری مستطیلی، هنگامی که هر دو جریان پخش و سوق در جریان آشکار ساز سهیم هستند. ۳۹.....
- شکل ۳-۵: (a) سطح مقطع دیود نوری $p-i-n$ (b) نمودار نوار انرژی تحت بایاس معکوس (c) مشخصه‌ی تولید حامل‌ها. ۴۰.....
- شکل ۳-۶: طرح دیود نوری $p-i-n$ InGaAs. ۴۲.....
- شکل ۳-۷: (a) طرح APD، همراه با توزیع میدان-الکتریکی داخل لایه‌های مختلف، تحت اثر بایاس معکوس؛ (b) طرح APD سیلیسیم. ۴۴.....
- شکل ۳-۸: (a) ساختار آشکار ساز نوری (MSM). (b) نمودار نوار انرژی متناظر در تعادل گرمایی که Φ_{n1} و Φ_{n2} ارتفاع سد های الکترون و V_{D1} و V_{D2} پتانسیل های داخلی به ترتیب برای اتصالات ۱ و ۲ هستند. ۴۶.....
- شکل ۳-۹: شرط تماس که در آن دو ناحیه‌ی تخلیه با هم تماس پیدا می‌کنند. ولتاژ متناظر V_{RT} ولتاژ تماس نامیده می‌شود. ۴۷.....

- شکل ۳-۱۰: شرط نوار-تخت، که در آن نوار انرژی در $x=L$ تخت می‌شود. ولتاژ متناظر V_{FB} ، ولتاژ نوار-تخت نامیده می‌شود. ۴۸.....
- شکل ۳-۱۱: شرط برای ولتاژ اعمالی بزرگتر از V_{FB} . $\Delta\Phi_p$ نیروی-تصویری کاهش دهنده‌ی سد Φ_{p2} است. ۴۹ ..
- شکل ۳-۱۲: تصویر آشکار ساز نوری (MSM) ۵۰.....
- شکل ۳-۱۳: تصویر SEM از آشکار ساز نوری (MSM) بر پایه GaAs- در ابعاد زیر میکرون ۵۰.....
- شکل ۳-۱۳: سطح مقطع یک MSM PD ۵۱.....
- شکل ۳-۱۵: نمودار نوار انرژی MSM PD، تحت بایاس و روشنایی، مؤلفه‌های جریان تاریک و جریان نوری نشان داده شده است. ۵۲.....
- شکل ۴-۱: ساختار معمول آشکار ساز نوری MSM ۵۶.....
- شکل ۴-۲: ساختار آشکار ساز نوری MSM با اتصالات فلزی به پهنای W و طول l ، که به فاصله‌ی L از یکدیگر جدا شده‌اند. ۵۷.....
- شکل ۴-۳: چگالی الکترون (cm^{-3}) بر حسب موقعیت (μm) را برای ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد. ۶۲.....
- شکل ۴-۴: چگالی حفره (cm^{-3}) بر حسب موقعیت (μm) را برای ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد. ۶۳.....
- شکل ۴-۵: جریان نوری کل بر حسب ولتاژ اعمالی در آشکار ساز نوری MSM، برای چند مقدار طول عمر. ۶۷.....
- شکل ۴-۶: جریان نوری کل بر حسب طول عمر در آشکار ساز نوری MSM، برای چند مقدار ولتاژ. ۶۹.....

- شکل ۴-۷: جریان نوری الکترون، حفره و جریان نوری کل بر حسب زمان در ولتاژ ۰.۴ ولت ۷۶
- شکل ۴-۸: جریان نوری الکترون، حفره و جریان نوری کل بر حسب زمان در ولتاژ ۰.۱ ولت ۷۷
- شکل ۴-۹: جریان نوری کل بر حسب زمان برای طول عمرهای مختلف در ولتاژ ۰.۴ ولت ۷۸
- شکل ۴-۱۰: جریان نوری کل بر حسب زمان برای طول عمرهای مختلف در ولتاژ ۰.۲ ولت ۷۹
- شکل ۴-۱۱: جریان نوری کل بر حسب زمان برای انرژی‌های پالس نوری مختلف در ولتاژ ۰.۱ ولت ۸۰
- شکل ۴-۱۲: جریان نوری کل بر حسب زمان برای انرژی‌های پالس نوری مختلف در ولتاژ ۰.۳ ولت ۸۱
- شکل ۴-۱۳: چگالی الکترون‌ها بر حسب موقعیت مکانی برای آشکار ساز نوری MSM در ولتاژ ۰.۲ ولت ۸۳
- شکل ۴-۱۴: چگالی الکترون‌ها بر حسب موقعیت مکانی برای آشکار ساز نوری MSM در ولتاژ ۰.۴ ولت ۸۴
- شکل ۴-۱۵: منحنی جریان الکترون و حفره و جریان کل بر حسب زمان برای آشکار ساز نوری MSM در ولتاژ ۰.۲ ولت ۸۵
- شکل ۴-۱۶: منحنی جریان الکترون و حفره و جریان کل بر حسب زمان برای آشکار ساز نوری MSM در ولتاژ ۰.۴ ولت ۸۶

بررسی تحلیلی پاسخ آشکار ساز نوری نسبت به پالسهای تاییده شده بر سطح آن
تهمینه محمد علی زاده

آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز (MSM) در سیستم های مخابرات نوری مدرن به کار می رود. به دلیل ساختار هندسی تخت، این آشکار ساز دارای ظرفیت خازنی پایین تری نسبت به دیگر انواع آشکار سازها می باشد و این منجر به زمان تأخیر کوچکتر و در نتیجه، دارای پهنای باند بزرگتری می باشد. در این پایان نامه، رفتار آشکار ساز نوری با استفاده از معادلات پیوستگی در یک بعد، برای هر دو حالت پایا و دینامیک (وابسته به زمان) مورد بررسی قرار می گیرد. معادلات پیوستگی در هر دو حالت به صورت تحلیلی حل شده و غلظت حامل ها و همین طور جریان های نوری تعیین شده اند. با اعمال پارامترهای مربوط به آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز از نوع گالیم آرسناید، اثر پخش، باز ترکیب و سوق حامل ها روی جریان مورد مطالعه قرار می گیرد. همچنین معادلات پیوستگی در حالت وابسته به زمان، با استفاده از تبدیل انتگرالی فوریه حل شده است. غلظت حامل ها و جریان بر حسب زمان شبیه سازی شده است.

واژه های کلیدی: آشکار ساز نوری، پخش، پاسخ پالس، تبدیل فوریه، نیمه رسانا ها

Abstract:

Study of analytical the response of photodetector to pulses illuminated on surface it.

Tahmineh Mohammadalizadeh

Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Photodetector is used in modern optical communication systems. Due to flat geometric structure, this photodetector has a lower capacitance with respect to other kind of photodetectors. This feature leads to smaller delay time and hence larger bandwidth. In this thesis, the photodetector's behavior has been studied in both steady state and dynamic(time-dependent) conditions by using continuity equation in one dimension. The continuity equation, in both cases, is solved analytically and the carrier concentration as well as photocurrent. By applying the related parameters of GaAs metal-semiconductor-metal Photodetector, the effect of carrier's diffusion, recombination and drift on photocurrent has been studied. The time-dependent continuity equations has been solved using the Fourier transform integral. The carrier concentration and photocurrent versus time is simulated.

Key words: Photodetector, Diffusion, Pulse response, Fourier transform, Semiconductors.

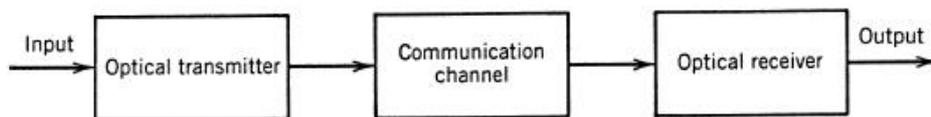
فصل ١

مقدمه

۱-۱ مقدمه

سیستم مخابرات^۱، اطلاعات را از یک مکان به مکانی دیگر - که با مسافت های چندین کیلومتر یا مسافت های اقیانوسی^۲ از یکدیگر جدا شده اند - منتقل می کند. اغلب اطلاعات به وسیله ی موج حامل الکترومغناطیسی^۳ که فرکانس آن می تواند از چند مگا هرتز تا چند ترا هرتز تغییر کند، حمل می شود. در سیستم های مخابرات نوری^۴، حامل های با فرکانس بالا ($\sim 10^0 THz$) در ناحیه ی مرئی^۵ یا نزدیک فرورسرخ^۶ طیف الکترومغناطیسی استفاده می شوند. این سیستم ها، گاهی سیستم های موجی نوری^۷ نامیده می شوند، تا از سیستم های میکروموجی، که فرکانس حامل آن، نوعاً ۵ مرتبه کوچکتر، با بزرگی ($\sim 1 GHz$) است، تمیز داده شوند. سیستم های مخابرات فیبر - نوری^۸، سیستم های موجی نوری هستند، که برای انتقال اطلاعات^۹ از فیبرهای نوری^{۱۰} استفاده می کنند. چنین سیستم هایی، از سال ۱۹۸۰ به طور گسترده ای در جهان مورد استفاده قرار گرفتند. در واقع، تکنولوژی موجی نوری همراه با میکروالکترونیک^{۱۱}، عامل اصلی در ظهور عصر اطلاعات^{۱۲} بوده اند.

نمودار کلی سیستم مخابرات نوری در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: سیستم کلی مخابرات نوری

^۱ Communication system

^۲ Transoceanic distances

^۳ Electromagnetic carrier

^۴ Optical communication systems

^۵ Visible

^۶ Near - infrared

^۷ Lightwave systems

^۸ Fiber - optic communications systems

^۹ Information transmission

^{۱۰} Optical fibers

^{۱۱} microelectronic

^{۱۲} Information age

این سیستم شامل یک فرستنده^۱، کانال مخابراتی^۲ و گیرنده^۳ است، که اجزا مشترک همه‌ی سیستم‌های مخابراتی است. نقش کانال مخابراتی، انتقال سیگنال نوری از فرستنده به گیرنده بدون واپیچش^۴ آن است. اغلب سیستم‌های موجی نوری از فیبرهای نوری به عنوان کانال مخابراتی استفاده می‌کنند، زیرا فیبرهای سیلیکا نور را با اتلافی به کوچکی 0.2 dB/km می‌تواند انتقال دهد، که در این صورت توان نوری بعد از 100 km تنها یک درصد کاهش می‌یابد. نقش فرستنده‌ی نوری، تبدیل سیگنال الکتریکی به شکل نوری است و نیز ارسال سیگنال نوری نتیجه شده به داخل فیبر نوری است. فرستنده شامل منبع نوری^۵ است. لیزرهای نیمه رسانا^۶ یا دیودهای نور گسیل^۷، به دلیل سازگاری با کانال مخابراتی فیبر نوری، به عنوان منابع نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. مؤلفه‌ی مهم دیگر، آشکار ساز نوری^۸ است، که در بخش گیرنده‌ی سیستم مخابرات فیبر نوری واقع است. آشکار سازهای نوری، برای تبدیل پالس‌های نوری به سیگنال‌های الکتریکی به کار می‌روند [۲].

موضوع اصلی این پایان نامه، آشکار سازهای نوری است. هدف کلی ما، افزایش سرعت پاسخ این قطعه است. عملکرد آشکار ساز نوری با جریان تاریک^۹، بازده کوانتومی^{۱۰}، پهنای باند^{۱۱} (یا سرعت) و گستره‌ی طیفی^{۱۲} اندازه‌گیری می‌شود [۳]. آشکار سازهای نوری باید دارای حساسیتی^{۱۳} بالا در طول موج‌های عملیاتی، سرعت پاسخ بالا^{۱۴}، نویز^{۱۵} و هزینه پایین^{۱۶} باشند [۴].

اساساً دو نوع آشکار ساز نوری نیمه رسانا وجود دارد: نوررساناها^{۱۷} و دیودهای نوری^{۱۸}

Optical transmitter^۱

Communication channel^۲

Receiver^۳

Distorting^۴

Optical source^۵

Semiconductor lasers^۶

Light – emitting diodes^۷

Photodetector^۸

Dark current^۹

Quantum efficiency^{۱۰}

Bandwidth^{۱۱}

Spectral range^{۱۲}

sensitivity^{۱۳}

Fast response^{۱۴}

Low noise^{۱۵}

Low cost^{۱۶}

Photoconductors^{۱۷}

Photodiodes^{۱۸}

نور رسانا ها، ساده ترین آشکار ساز نوری نیمه رسانا هستند و شامل ماده نیمه رسانا با دو تماس اهمی^۱ با مقاومت پایین است. نور فرودی به نیمه رسانا، که دارای انرژی ($h\nu$) بزرگتر از انرژی گاف نواری E_g نیمه رسانا است، جذب شده و تولید زوج الکترون-حفره^۲ می کند. زوج های الکترون و حفره در مقاومت ویژه^۳ نیمه رسانا، تغییر ایجاد می کنند. این تغییر، از طریق مدار خارجی^۴ یا تقویت^۵ تغییر در رسانندگی یا جمع آوری جریان نوری^۶ القا شده، اندازه گیری می شود. نور رسانا ها، قطعات کندی^۷ هستند، اما بهره^۸ قابل توجهی دارند.

دیود های نوری از پیوند های $p-n$ مواد نیمه رسانا می توانند ساخته شوند. آنها تحت بایاس معکوس، در ربع سوم منحنی جریان بر حسب ولتاژ (I-V) عمل می کنند. بدون نور فرودی، جریان کوچک تولید-باز ترکیب شارش می یابد، که معمولاً جریان تاریک گفته می شود و این جریان نویز زمینه است. هنگامی که نور با $h\nu \geq E_g$ به سطح نیمه رسانا می تابد، زوج الکترون-حفره تولید می شود. الکترون ها و حفره ها به سرعت توسط الکتروود های مثبت و منفی کشیده می شوند. دیود های نوری قطعات بسیار سریعی هستند. اما به طور کلی بهره ی قابل توجهی ندارند [۳]. دیود های نوری شامل دیود های نوری $p-i-n$ و دیود های نوری بهمنی^۹ (APDs) می باشند.

در چند دهه ی اخیر آشکار ساز های نوری پیوندی نیمه رسانا با سرعت بالا توسعه یافته اند، که از آن جمله می توان به آشکار ساز های نوری فلز-نیمه رسانا-فلز^{۱۰} (MSM) و آشکار ساز های نوری فلز-نیمه رسانا-فلز پس دریچه دار شده^{۱۲} (BGMSM) اشاره کرد. آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز پس دریچه دار شده (BGMSM) با اضافه کردن تماس اهمی - تماس پس دریچه - به یک آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز (MSM) ساخته می شود [۵]. آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز در سیستم های مخابرات نوری مدرن به کار می رود. این آشکار ساز های نوری شامل دو اتصال شاتکی^{۱۳} روی سطح نیمه رسانای تقریباً ذاتی است [۶].

^۱ Ohmic contacts

^۲ Electron - hole pairs

^۳ Resistivity

^۴ External circuit

^۵ Amplifying

^۶ Photocurrent

^۷ Slow

^۸ Gain

^۹ Avalanche photodiodes

^{۱۰} Metal - Semiconductor - Metal

^{۱۲} Back - Gated MSM

^{۱۳} Schottky contacts

در این پایان نامه، این نوع از آشکار سازها مورد بررسی قرار گرفته است. ماده انتخابی برای قطعه‌ی مورد نظر، نیمه رسانا GaAs است. این نیمه رسانا دارای انرژی گاف نواری 1.49 eV است. ویژگی گاف نواری مستقیم^۱ این نیمه رسانا، باز ترکیب سریع تر حامل‌ها را نسبت به ماده‌ای با گاف نواری غیر مستقیم^۲ فراهم می‌کند. از این رو آشکار ساز نوری سریع تری را نتیجه می‌دهد. همچنین اندازه گاف نواری 1.43 eV ، می‌تواند فوتون‌های نور با طول موج کوچکتر از 830 nm را جذب کند [۲]. به دلیل ساختار هندسی تخت، این آشکار سازهای نوری دارای ظرفیت پایین تری نسبت به دیگر انواع آشکار سازها می‌باشد و این منجر به زمان تأخیر کوچکتر می‌شود و از این رو این قطعه، پهنای باند بزرگتری را نتیجه می‌دهد. فرایند ساخت این قطعه بسیار ساده است و سازگار با فرایند مدارهای مجتمع شده^۳ (IC) معمول است [۶]. آشکار ساز نوری با ماده‌ی نیمه رسانا مناسب در سیستم‌های انتقال مختلف، به خوبی می‌تواند کار کند. برای مثال، گیرنده‌هایی که بر اساس GaAs ساخته شده، برای طول موج کوتاه لینک‌های کوتاه-برد^۴ مخابراتی مناسب است [۷]. گیرنده‌هایی که بر اساس InGaAs ساخته می‌شود، می‌تواند در مخابرات نوری بلند-برد^۵ به کار برده شود [۸]. این نوع آشکار سازهای نوری به دلیل گاف نواری کوتاه‌شان، در هر دو نوار $1.55 \mu\text{m}$ و $1.3 \mu\text{m}$ استفاده می‌شود. آشکار سازهای نوری ساخته شده بر اساس GaN، در گستره‌ی طول موج از 200 تا 356 نانومتر، اجزا مهمی در کاربرد های نظامی و به علاوه کاربرد تجاری هستند [۹].

در فصل دوم این پایان نامه مروری بر خواص نیمه رساناها خواهیم داشت. در فصل سوم، طرز کار انواع آشکار سازها را بررسی می‌کنیم و عملکرد آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز را به تفصیل مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در فصل چهارم، رفتار آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز با استفاده از معادلات پیوستگی در یک بعد، برای هر دو حالت پایا و دینامیک (وابسته به زمان) مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادلات پیوستگی در هر دو حالت به صورت تحلیلی حل شده و غلظت حامل‌ها و همین‌طور جریان‌های نوری تعیین شده‌اند. با اعمال پارامترهای مربوط به آشکار ساز نوری فلز-نیمه رسانا-فلز از نوع گالیم آرسناید، اثر پخش، باز ترکیب و سوق حامل‌ها روی جریان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین معادلات پیوستگی در حالت وابسته به زمان، با استفاده از نظریه‌ی تبدیل انتگرالی به صورت تحلیلی حل شده است. تبدیل انتگرالی مورد استفاده در این مورد، تبدیل فوریه است. در اینجا غلظت حامل

^۱ Direct bandgap

^۲ Indirect bandgap

^۳ Integrated circuit

^۴ Short distance

^۵ Long distance