



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش الکترونیک

آنالیز، شبیه سازی و بهبود کیفی لیزرهای ترانزیستوری

نگارش

حسن رهباردار مجاور

استاد راهنما

دکتر حسن کاتوزیان

مهرماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی برق - الکترونیک

آنالیز، شبیه سازی و بهبود کیفی لیزرهای ترانزیستوری

نگارش

حسن رهباردار مجاور

استاد راهنما

دکتر حسن کاتوزیان

مهرماه ۱۳۹۰

با تشکر از دکتر حسن کاتوزیان که با راهنماییهای علمی و فنی خود نقش بسزایی در انجام این پروژه داشتند، و با ایجاد فضایی علمی و مناسب برای فعالیتهای تحقیقاتی در آزمایشگاه تحقیقاتی فتونیک تلاشهای زیادی نموده اند.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

چکیده:

لیزر ترانزیستوری که یکی از جدیدترین ادوات الکترونیک-فتونیک است، برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید. از آنجا که این قطعه نقش مهمی در آینده دنیای فتونیک، خصوصاً پردازنده‌های نوری ایفا خواهد کرد، مطالعات گسترده‌ای در جهت بهبود عملکرد این قطعه توسط محققان در حال اجرا است. این پروژه نیز با هدف آنالیز، شبیه سازی و بهبود کیفی لیزرهای ترانزیستوری انجام میگیرد.

پیش از هرگونه شبیه‌سازی، ارائه مدلی مناسب برای لیزر ترانزیستوری ضروری است. به همین منظور در ابتدای کار مدلی که بر پایه مدل کنترل بار میباید برای آنالیز لیزر ترانزیستوری معرفی شده و بر مبنای آن مدلسازی این قطعه انجام میپذیرد. در اولین گام شبیه‌سازی، لیزرهای ترانزیستوری از جنس InGaP/GaAs که مرسومترین نوع لیزرهای ترانزیستوری میباشند مورد بررسی قرار گرفته و پس از شبیه‌سازی این قطعات و تحلیل نتایج، تأثیر تغییر عرض بیس بر پاسخ فرکانسی نوری و بهره جریان آنها بدست می‌آید. بدین ترتیب با بهینه کردن عرض بیس این لیزرها پاسخ فرکانسی آنها بهبود یافته و پهنای باند آنها نیز افزایش می‌یابد. عرض بیس بهینه برای لیزر ترانزیستوری نمونه معرفی شده در این بخش برابر با 1000\AA است که به ازای این مقدار، پهنای باند لیزر ترانزیستوری تا حدود 2GHz بهبود می‌یابد.

در گام بعدی لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا که نسل جدیدی از لیزرهای ترانزیستوری میباشند و در طول موجهای نزدیک به $1.55\mu\text{m}$ عمل میکنند مورد بررسی قرار میگیرند. در این پروژه برای اولین بار مدلی کامل برای این نوع لیزرهای ترانزیستوری ارائه میگردد. در ادامه با شبیه سازی این مدل، پاسخ فرکانسی این قطعات بدست آمده و با بررسی آن نقاط ضعف آنها که مهمترین آنها وجود پیک رزونانسی بزرگ در پاسخ فرکانسی است، مشخص میگردد. پس از آن با استفاده از شبیه سازی و تغییر پارامترهای مختلف برای یک نمونه لیزر ترانزیستوری طول موج بالا تأثیر هر یک از این پارامترها بر پاسخ فرکانسی این قطعات بررسی میگردد. با تغییر همین پارامترها پیک رزونانسی این قطعات تا 7dB کاهش و پهنای باند نیز تا 15GHz افزایش داده میشود.

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه	۱
۱-۱: لیزرهای ترانزیستوری	۲
۲-۱: مسئله مورد نظر پایان نامه	۳
۳-۱: ساختار پایان نامه	۴
فصل دوم: لیزرهای ترانزیستوری	۵
۱-۲: عملکرد لیزر ترانزیستوری	۶
۲-۲: اولین نمونه لیزر ترانزیستوری	۶
۳-۲: افزایش پهنای باند در نمونه بعدی	۸
۴-۲: لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا	۱۱
فصل سوم : مدلسازی لیزر ترانزیستوری	۱۳
۱-۳: معرفی مدل	۱۴
۲-۳ آنالیز DC	۱۷
۳-۳ آنالیز AC	۱۸
فصل چهارم : بهبود عرض بیس در لیزرهای ترانزیستوری با ساختار InGaP/GaAs	۲۲
۱-۴ : ساختار لیزر ترانزیستوری	۲۳
۲-۴ : تاثیر عرض بیس بر پاسخ فرکانسی نوری	۲۵

۲۷	..... تأثیر عرض بیس بر بهره جریان	۳-۴
۲۹	..... فصل پنجم : تحلیل پاسخ فرکانسی لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا	
۳۰	..... ۱-۵: لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا	
۳۱	..... ۲-۵: تعیین پارامترهای مدل برای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا	
۳۱	..... τ_{qw} : ۱-۲-۵	
۳۳	..... τ_{cap} : ۲-۲-۵	
۳۳	..... τ_{rb0} : ۳-۲-۵	
۳۴	..... τ_p : ۴-۲-۵	
۳۵	..... Ω, n_{tr} : ۵-۲-۵	
۳۶	..... ۳-۵: تعیین پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا	
۳۷	..... ۴-۵: بررسی تأثیر عرض چاه کوانتومی بر پاسخ فرکانسی لیزر طول موج بالا	
۴۰	..... ۵-۵: بررسی تأثیر عرض بیس بر پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا	
۴۳	..... فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات	
۴۴	..... ۱-۶: جمع بندی و نتیجه گیری	
۴۵	..... ۲-۶: پیشنهادات	
۴۷	..... منابع و مراجع	
۵۰	..... ضمیمه ۱ : مدل کنترل بار برای لیزر ترانزیستوری	

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: شماتیک یک لیزر ترانزیستوری ۲
- شکل ۱-۲: ساختار لایه ای اولین لیزر ترانزیستوری از جنس InGaP/GaAs ۷
- شکل ۲-۲: اعوجاج در منحنی I-V در لیزرهای ترانزیستوری ۸
- شکل ۳-۲: طیف تابشی لیزر ترانزیستوری بر حسب جریان I_B ۹
- شکل ۴-۲: پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری برای جریانهای بیس مختلف ۱۰
- شکل ۵-۲: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا ۱۱
- شکل ۶-۲: طول موج لیزر ترانزیستوری طول موج بالا برای دو نقطه بایاس متفاوت ۱۲
- شکل ۱-۳: مدل کنترل بار برای ناحیه بیس یک لیزی ترانزیستوری n-p-n ۱۴
- شکل ۲-۳: منحنی های چگالی جریان آستانه، چگالی فتونها در حالت ماندگار و طول عمر بازترکیب القایی لیزر ترانزیستوری ۱۸
- شکل ۳-۳: پاسخ فرکانس نوری ۳ نمونه لیزر ترانزیستوری به دست آمده توسط مدل مطرح شده .. ۲۰
- شکل ۱-۴: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستوری مطرح شده در این بخش ۲۴
- شکل ۲-۴: پاسخ فرکانسی نوری لیزر ترانزیستوری برای عرض بیسهای مختلف ۲۶
- شکل ۳-۴: پهنای باند نوری لیزر ترانزیستوری بر حسب عرض بیس برای مقادیر مختلف جریان بایاس ۲۷
- شکل ۴-۴: بهره جریان لیزر ترانزیستوری بر حسب عرض بیس ۲۸
- شکل ۱-۵: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا ۳۰

- شکل ۲-۵: طول عمر باز ترکیب خودبخودی بر حسب عرض چاه کوانتمی برای طول موجهای مختلف ۳۳
- شکل ۳-۵: پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا ۳۷
- شکل ۴-۵: پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا به ازای مقادیر مختلف عرض چاه کوانتمی ۳۸
- شکل ۵-۵: اندازه پیک رزونانس پاسخ فرکانسی بر حسب عرض چاه کوانتمی ۳۹
- شکل ۶-۵: پهنای باند لیزر ترانزیستوری طول موج بالا بر حسب عرض چاه کوانتمی ۴۰
- شکل ۷-۵: پهنای باند نوری لیزر ترنزیستوری طول موج بالا بر حسب عرض بیس به ازای عرض چاههای مختلف ۴۱
- شکل ۸-۵: اندازه پیک رزونانس پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا بر حسب عرض بیس ۴۲
- شکل الف: منحنی I-V لیزر ترانزیستوری و چگالی حاملهای اقلیت در ناحیه بیس ۵۱
- شکل ب: آنالیز بار برای توزیع حاملهای بیس ۵۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: تعریف پارامترها و مقادیر فیزیکی به کار رفته در مدل لیزر ترانزیستوری ۱۶
- جدول ۱-۴: پارامترها و مقادیر فیزیکی برای لیزر ترانزیستوری مطرح شده در فصل چهارم ۲۵
- جدول ۱-۵: پارامترهایی از مدل لیزر ترانزیستوری که با توجه به مشخصات فیزیکی این قطعه بدست می آیند ۳۱
- جدول ۲-۵: پارامترهای فیزیکی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا مطرح شده در فصل پنجم ۳۶

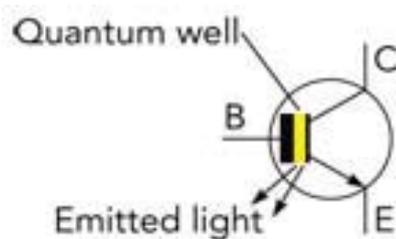
فصل اول

مقدمه

۱-۱: لیزرهای ترانزیستوری

ترانزیستور، قطعه ای که در سال ۱۹۴۷ اختراع شد، در حال حاضر سالانه حجمی بالغ بر ۳۰۰ میلیارد دلار از صنعت آمریکا را تشکیل می‌دهد. این قطعه در ۶۰ سال گذشته خدمات وسیعی به بشر کرد و امروز اضافه شدن نور به آن، نوید دست یافتن به سرعت بالاتر در ارتباطات درون تراشه ای و بیرون تراشه ای را می‌دهد. دنیای پردازش و کامپیوترهای نوری سالهاست که از عدم وجود قطعه ای که نقش ترانزیستور را در الکترونیک داشته باشد، رنج میبرد.

لیزر ترانزیستوری یک قطعه سه پایه است که علاوه بر عملکرد عادی مشابه با ترانزیستورهای معمول، تولید سیگنال نوری نیز می‌نماید. این قطعه که با یک ورودی سیگنال الکتریکی، دو خروجی الکتریکی و نوری ایجاد میکند، میتواند کاربردهای وسیعی از جمله انتقال اطلاعات با نرخهای بسیار بالا داشته باشد. شکل ۱-۱ شماتیک یک لیزر ترانزیستوری را نمایش می‌دهد که در آن بر عملکرد الکتریکی و تولید نور به شکل همزمان تاکید شده است. همچنین چاه کوانتومی که یکی از مهمترین بخشهای لیزر ترانزیستوری است نیز در این شکل نمایش داده شده است. [1]



شکل ۱-۱: شماتیک یک لیزر ترانزیستوری

اکنون بیش از ۴۰ سال از اختراع دیودها و لیزرهای ساع کننده نور و بیش از ۶۰ سال از اختراع ترانزیستور میگذرد، اما تاکنون قطعه ای که با دریافت یک سیگنال الکتریکی دو خروجی الکتریکی و نوری را ارائه کند در اختیار نداشته ایم. عدم اختراع لیزر ترانزیستوری به دلیل عدم اهمیت آن نبوده است، بلکه کمبود ایده های مفید سبب تأخیر در اختراع این قطعه گردیده است. در اوایل دهه ۱۹۸۰ گروهی در

California Institute of Technology با اتصال یک دیود لیزری و یک ترانزیستور توسط سیمی به یکدیگر، سعی در ساختن وسیله ای شبیه به لیزر ترانزیستوری داشتند که هر دو سیگنال الکتریکی و نوری را تولید کند، اما این وسیله به صورت همزمان و یکپارچه این کار را انجام نمیداد.

در سال ۱۹۹۲ محققان در Interuniversity Micro Electronic Center در بلژیک ترانزیستوری از جنس InGaAs ساختند که در دمای نیتروژن مایع نور تولید میکرد. حتی برخی گروهها گزارش کار ترانزیستور مشابهی را در دمای اتاق نیز دادند، اما در هیچکدام تابش نور به شکل القایی^۱ و همزمان با آن عملکرد قطعه به شکل ترانزیستوری با بهره جریان نبود. اما در سال ۲۰۰۴ گروهی در دانشگاه ایلینوی آمریکا به رهبری میلتون فنگ و نیک هولنیاک (مخترع LED در اوایل دهه ۱۹۶۰) قطعه ای با دو خروجی نوری و الکتریکی به نام لیزر ترانزیستوری را معرفی کردند که به نظر میرسد در آینده تحولات اساسی در صنعت فوتونیک مخابرات و پردازنده های نوری ایجاد کند.

برای روشن کردن تحولی که لیزر ترانزیستوری میتواند در دنیای مخابرات و پردازش نوری ایجاد کند باید به این نکته اشاره کرد که فرستنده و گیرنده های نوری امروزی چگونه کار میکنند. در سیستمهای امروزی در ابتدا یک کامپیوتر سیگنال الکتریکی را به یک فرستنده نوری ارسال میکند. در فرستنده نوری یک درایور برای تبدیل سیگنال الکتریکی به پالسهای نوری و اعمال آنها به لیزر یا LED به کار میرود. سپس این پالس از طریق یک فیبر نوری انتقال داده شده و در سر دیگر فیبر توسط یک آشکارساز نوری دریافت میگردد. این آشکارساز نوری سیگنالهای نوری را به پالسهای الکتریکی تبدیل میکند.

اکنون پیاده سازی سیستم مشابه را داخل تراشه در ابعاد ترانزیستوری تصور کنید. در این حالت میتوان از لیزر ترانزیستوری برای تبدیل سیگنال الکتریکی به سیگنال نوری استفاده کرد. در آینده نزدیک با استفاده از پردازنده های تمام نوری و لیزرهای ترانزیستوری میتوان چیپهای نوری تهیه کرد که در آنها انتقال اطلاعات در موجبرهای نوری صورت گیرد و سرعت پردازش اطلاعات بسیار بالاتر از چیپهای امروزی که در آنها از مسیرهای حامل جریان الکتریکی استفاده میگردد باشد.

^۱ - Stimulated

به هر صورت همانطور که آقای نیک هولنیاک هنگام اختراع LED تصور این را نداشت که روزی این قطعه پرکاربردترین تولید کننده نور در دنیای فوتونیک خواهد بود و از چراغهای خودرو تا بردهای الکترونیکی از آن استفاده خواهند کرد، اکنون نیز تمامی کاربردهای گسترده لیزر ترانزیستوری در آینده برای ما مشخص نیست. [2]

۲-۱: مسئله مورد نظر پایان نامه

از آنجا که لیزرهای ترانزیستوری هنوز در ابتدای راه به سر میبرند، نیاز به تحلیل و بررسی بیشتر در حوزه های مختلف آن به شدت احساس میگردد. پاسخ فرکانسی نوری لیزرهای ترانزیستوری یکی از مهمترین مسائلی است که برای تکامل آن، کاربرد در صنعت و رسیدن به تولید انبوه باید مدنظر قرار گیرد. همچنین برای بررسی پاسخ فرکانسی و بهبود آن نیاز به مدلسازی لیزر ترانزیستوری و تعیین پارامترهای مختلف آن در مدل مورد نظر میباشد. همانطور که در فرم پیشنهاد پروژه مشخص شده است، در پایان این پروژه انتظار می رود یک نمونه لیزر ترانزیستوری تحلیل، مدلسازی و شبیه سازی شده و با استفاده از نتایج شبیه سازی، تغییراتی در پارامترهای آن برای بهبود عملکرد کیفی این قطعه انجام گیرد.

۳-۱: ساختار پایان نامه

ساختار این پایان نامه مشتمل بر ۶ فصل میباشد. پس از فصل اول که به بیان مقدمات میپردازد، در فصل دوم تاریخچه لیزرهای ترانزیستوری و کارهای انجام شده در این حوزه و نمونه های مختلف ساخته شده از این قطعه به طور اجمالی معرفی میگردند. در فصل سوم مدلسازی لیزر ترانزیستوری بر اساس مدلی که بر پایه مدل کنترل بار است ارائه میگردد تا به کمک آن تحلیلهای مختلف در مورد لیزرهای ترانزیستوری گوناگون صورت گیرد. تا این قسمت پایان نامه را گردآوری اطلاعات لازم از منابع و مراجع گوناگون تشکیل میدهد اما فصلهای چهارم و پنجم به فعالیتهای جدید انجام شده در این پروژه میپردازد.

در فصل چهارم با استفاده از مدل ارائه شده در فصل سوم، تأثیر تغییر عرض بیس بر پاسخ فرکانسی و بهره جریان یک لیزر ترانزیستوری از جنس InGaP/GaAs بررسی شده و نتایج به دست آمده ارائه میگردد. در فصل پنجم تمامی پارامترهای مدل ارائه شده در فصل سوم، برای لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا¹ که نسل جدیدی از لیزرهای ترانزیستوری هستند ارائه شده و به این وسیله برای اولین بار پاسخ فرکانسی لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا در این پایان نامه بدست می آید. همچنین در این فصل مشکلات پاسخ فرکانسی این نوع لیزر ترانزیستوری بیان شده و تا اندازه ای بهبود نیز داده میشوند. همچنین تأثیر عرض چاه کوانتمی و عرض بیس بر پاسخ فرکانسی و بهره جریان این لیزرهای ترانزیستوری نیز بررسی میگردد. در فصل ششم و پایانی نیز پس از جمع بندی و نتیجه گیری پیشنهاداتی برای استفاده سایرین ارائه میگردد.

¹ - Long-Wavelength Transistor Lasers (LW-TL)

فصل دوم

لیزرهای ترانزیستوری

۲-۱: عملکرد لیزر ترانزیستوری

همانطور که گفته شده لیزر ترانزیستوری دارای ساختار ترانزیستورهای HBT میباشد. میدانیم که جریان بیس در ترانزیستورهای HBT از ۷ مؤلفه زیر میشود:

- تزریق حفره به ناحیه امیتر

- جریان بازترکیب سطحی سطوح خارجی بیس

- جریان بازترکیب اتصال اهمی بیس

- جریان بازترکیب در ناحیه تخلیه

- جریان بازترکیب غیر تابشی هال-شاکلی

- جریان بازترکیب آگر

- جریان بازترکیب تابشی

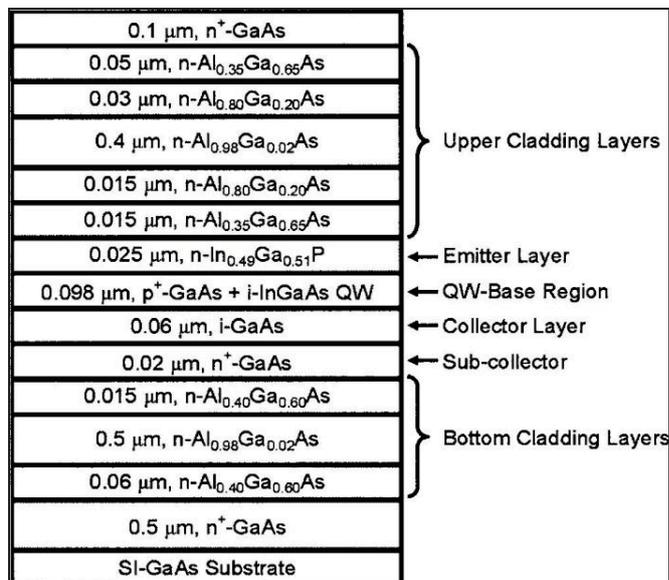
با غیرفعالسازی سطوح خارجی ، جریان بازترکیب سطحی قابل صرفنظر است. اما مورد آخر یعنی جریان بازترکیب تابشی در لیزر ترانزیستوری از بقیه موارد مهمتر میباشد. در یک لیزر ترانزیستوری برخی از حاملهای اقلیت که از بیس میگذرند در چاه کوانتومی بازترکیب شده و نور تولید میکنند و باقیمانده آنها که از چاه کوانتومی میگذرند به کلکتور رسیده و جریان کلکتور را ایجاد میکنند و سبب ایجاد بهره الکتریکی میشوند. [3]

۲-۲: اولین نمونه لیزر ترانزیستوری

در سال ۲۰۰۵ گزارش ساخت اولین لیزر ترانزیستوری هترو که عملکرد مناسبی در دمای اتاق داشت گزارش شد. این لیزر ترانزیستوری با عرض امیتر $2.2\mu\text{m}$ و طول کاواک $850\mu\text{m}$ جزء نمونه های

اکتشافی لیزر ترانزیستوری بود و هنوز به معیارهی اصلی خود نرسیده بود اما قابلیت عملکرد در فرکانس 3GHz در دمای 300°K را داشت.

شکل (۱-۲) لایه های مختلف این لیزر ترانزیستوری را نمایش میدهد. همانطور که مشاهده میشود این قطعه دارای لایه بیس به ضخامت 980Å از جنس GaAs است که یک چاه کوانتومی InGaAs با ضخامت 120Å برای تولید نور در طول موج حدود 1000nm در آن تعبیه شده است. سایر لایه های مختلف نیز در این شکل نشان داده شده است. در پروسه ساخت این HBT از ۸ ماسک برای سه مرحله شستشوی شیمیایی مرطوب^۱، سه مرحله شستشوی خشک^۲ و سه مرحله متالیزه کردن اتصالات تشکیل شده است. [4]



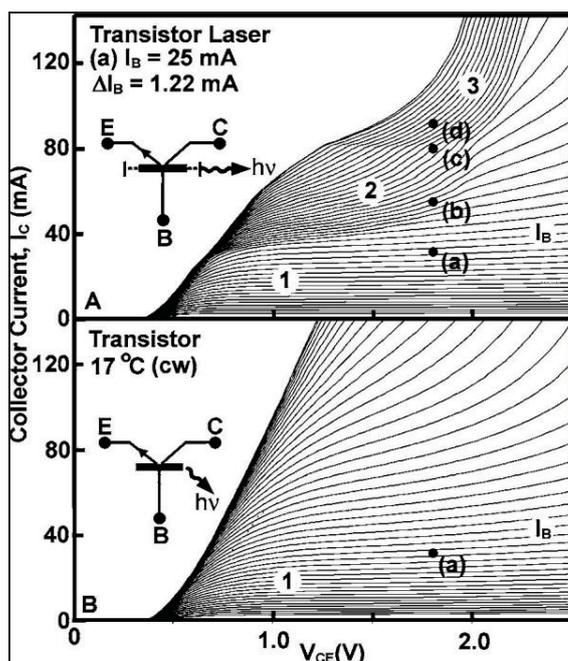
شکل ۱-۲: ساختار لایه ای اولین لیزر ترانزیستوری از جنس InGaP/GaAs

منحنی I-V این لیزر ترانزیستوری در بخش بالایی شکل (۲-۲) آمده است. در نگاه اول مشخص میشود که منحنی I-V آن در مناطقی که با "۲" و "۳" نمایش داده شده است، نسبت به ناحیه "۱" دچار اعوجاج گردیده است. در قسمت پایین شکل (۲-۲) مشخصه I-V همان ترانزیستور در شرایط مشابه،

¹ - Wet Chemical Etching

² - Dry Etching

تنها با این تفاوت که چاه کوانتومی آن با اضافه کردن Al_2O_3 از بین رفته است، رسم شده است. مشاهده میشود که در این حالت تنها ناحیه "1" که مربوط به بازترکیب خودبه خودی بیس است وجود دارد. شماتیک رسم شده برای دو ترانزیستور نیز به این معنا است که در حالت بالایی تابش به صورت القایی است و توان نوری بیشتری وجود دارد اما در حالت پایینی با از بین رفتن چاه کوانتومی تابش به شکل خودبه خودی است و توان نوری کمتری در خروجی دیده میشود. به همین دلیل، بطور کلی در منحنی های I-V به دست آمده از لیزرهای ترانزیستوری، نوعی فشردگی و کاهش گین β در این قطعات را نشان میدهد. به صورت شهودی میتوان گفت که افزایش بازترکیب حاملها در بیس لیزر ترانزیستوری نسبت به ترانزیستورهای معمولی سبب میگردد که تعداد حاملهایی که به کلکتور میرسند کمتر شده و بهره جریان نسبت به ترانزیستورهای معمولی کاهش یابد.



شکل ۲-۲: اعوجاج در منحنی I-V در لیزرهای ترانزیستوری

۳-۲: افزایش پهنای باند در نمونه بعدی

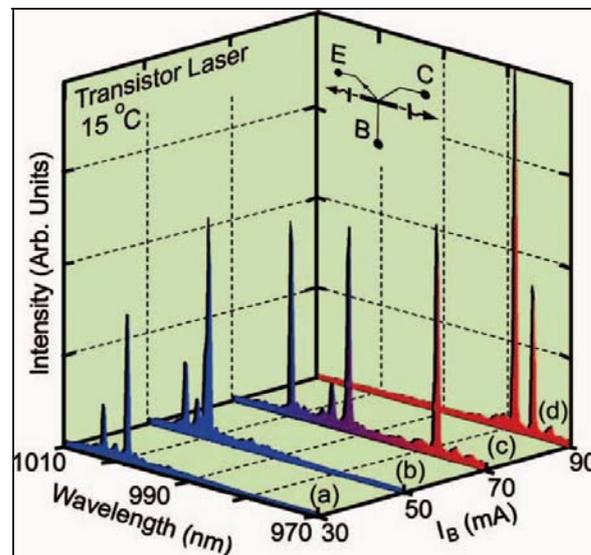
نمونه بعدی لیزر ترانزیستوری با طول کاواک $400\mu\text{m}$ و عرض امیتر $6\mu\text{m}$ که دارای پهنای باند مدولاسیون 13.5GHz بود در سال 2006 ، گزارش شد. ساختار این لیزر ترانزیستوری مشابه با مورد مطرح شده در شکل ۲-۱ می باشد و از لایه های InGaP ، InGaAs ، GaAs ، AlGaAs که روی بستر GaAs با روش MOCVD^1 رشد داده شده اند تشکیل شده است. بالای کلکتور این ترانزیستور، بیس آن از نوع p وجود دارد که از لایه های زیر تشکیل شده است: [5]

(a) لایه GaAs با ضخامت 210\AA به شکل تدریجی^۲ از آرایش $8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ تا $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$

(b) چاه کوانتومی InGaAs با ضخامت 160\AA بدون ناخالصی

(c) لایه GaAs با ضخامت 510\AA به شکل graded از آرایش $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ تا $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$

دمای مناسب عملکرد این لیزر ترانزیستوری 15°C می باشد. جریان آستانه $I_B = I_{th} = 23\text{mA}$ است و طیف نور خروجی برای جریانهای بیس مختلف و $V_{CE} = 1.5\text{V}$ در شکل ۳-۲ رسم شده است. برای $I_B < 23\text{mA}$ ، باز ترکیب خودبه خودی با پیک پهنی در اطراف $\lambda = 1005\text{nm}$ قالب است. در $I_B = 30\text{mA}$



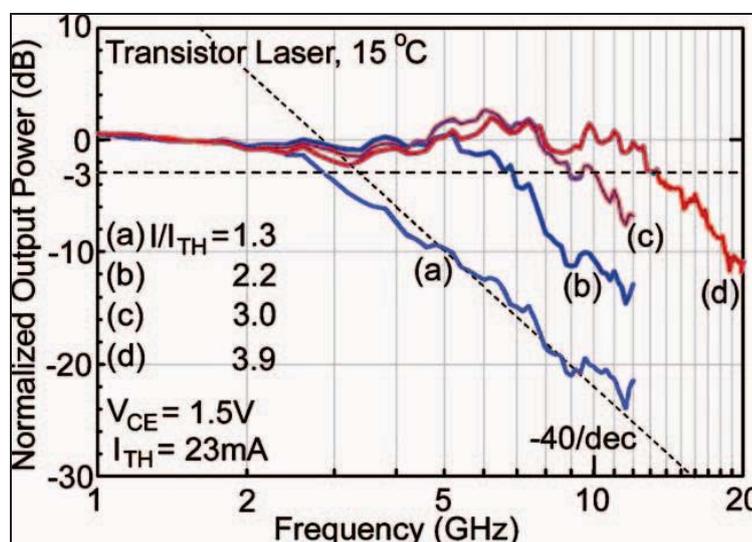
شکل ۳-۲: طیف تابشی لیزر ترانزیستوری بر حسب جریان I_B

¹ - Metal Organic Chemical Vapor Deposition

² - Graded

پیک طیف در $\lambda=1002\text{nm}$ قرار میگیرد. شدت نور خروجی در تراز پایه ($\lambda\sim 1000\text{nm}$) با افزایش I_B تا 50mA افزایش می یابد. در $I_B=70\text{mA}$ تابش لیزر در هر دو تراز پایه و برانگیخته چاه کوانتمی رخ میدهد. در $I_B=90\text{mA}$ تابش لیزر به طور عمده در تراز برانگیخته دیده میشود. ($\lambda\sim 978\text{nm}$)

شکل ۲-۴ پاسخ فرکانسی این لیزر ترانزیستوری را برای نقاط بایاس مشخص شده در شکل ۲-۳ را در $V_{CE}=1.5\text{V}$ نشان میدهد. مشاهده میشود که بر خلاف دیوهای لیزری، پیک رزونانس قابل توجهی در هیچ کدام از بایاسها اتفاق نمی افتد. پهنای باند -3dB در حالت $I/I_{th}=1.3$ در حدود 3GHz است که در حالت $I/I_{th}=3.9$ این مقدار به 13.5GHz نیز میرسد.



شکل ۲-۴: پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری برای جریانهای بیس مختلف

همانطور که در دو نمونه لیزر ترانزیستوری مطرح شده در بخش ۲-۲ و ۲-۲ مشاهده شد، غالب لیزرهای ترانزیستوری ساخته شده در سالهای ۲۰۰۵ الی ۲۰۰۸ و حتی غالب لیزرهای ترانزیستوری ساخته شده و مورد بحث امروزی ساختاری از جنس InGaP/GaAs و مشابه با شکل ۲-۱ دارند. مطالعات گسترده ای در مورد این لیزرهای ترانزیستوری و در جهت بهبود و تکامل آنها صورت میگیرد که در زیر تنها به ذکر نام چند نمونه آنها اکتفا میشود و اطلاعات بیشتر به مراجع واگذار میگردد:

- مدولاسیون سیگنال با استفاده از ترانزیستور لیزر با بهره جریان بالا $\beta > 49$ (سال ۲۰۰۷) [6]
- بهبود پهنای باند ترانزیستور لیزر با استفاده از سیگنال بیس کمکی (سال ۲۰۰۸) [7]

- مقایسه آرایش بیس Zn و C در ترانزیستور لیزر (سال ۲۰۰۹) [8]

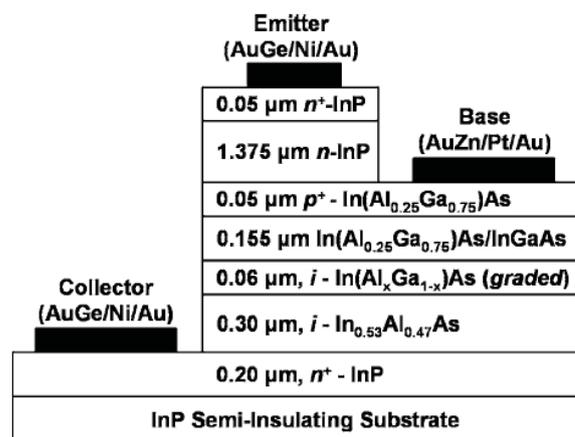
- ترانزیستور لیزر تک مود با استفاده از روش DFB¹ (سال ۲۰۱۰) [9]

- بهبود پهنای باند ترانزیستور لیزر با استفاده از آرایش بیس تصادفی (سال ۲۰۱۰) [10]

استفاده از ساختار InGaP/GaAs موجب میشود طول موج نور تولیدی تمامی این لیزرهای ترانزیستوری در حدود $1\mu\text{m}$ باشد. از طرفی تمایل به عملکرد لیزر ترانزیستوری در طول موجهای بالاتر خصوصاً $1.55\mu\text{m}$ که در این طول موج تلفات در فیبرهای نوری حداقل است، سبب شد که نسل جدیدی از لیزرهای ترانزیستوری به نام لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا² طراحی گردد. به دلیل اهمیت این لیزرهای ترانزیستوری و از آنجا که بخشی از کار این پایان نامه روی این لیزرها میباشد در بخش ۲-۳ به معرفی آنها میپردازیم.

۴-۲: لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا

در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار گزارش ساخت لیزر ترانزیستوری با ساختار InP/InAlGaAs/InAlAs که در دمای 185°C - و در طول موج 1544nm عمل میکرد، ارائه شد. شمای ساختار لایه های مختلف این لیزر ترانزیستوری در شکل ۲-۵ آورده شده است. [11]

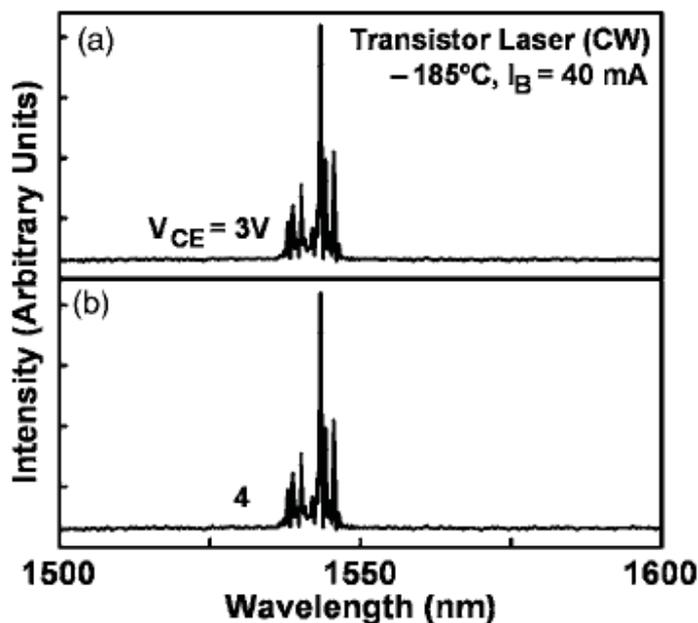


¹ - Distributed Feedback

² - Long-Wavelength Transistor Lasers (LWTL)

شکل ۲-۵: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا

بیس این لیزر ترانزیستوری از جنس InAlGaAs است که سه چاه کوانتومی از جنس $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$ در آن قرار دارد. جنس بیس و چاه کوانتومی مشخص کننده اختلاف سطوح انرژی بالک بیس و چاه کوانتومی و طول موج نور تولید شده میباشد. شکل ۲-۶ نشان میدهد که در بایاس $I_B=40\text{mA}$ و دو مقدار مختلف V_{CE} برابر با 3 و 4 ولت طول موج تولیدی این لیزر ترانزیستوری برابر با 1544nm میباشد. البته همانطور که در مقاله گزارش ساخت این قطعه آمده است، این لیزر ترانزیستوری نیاز به بهبود عملکرد دارد و این نمونه ابتدایی آن است که ساختار لایه ای و کاواک ساده ای دارد.



شکل ۲-۶: طول موج لیزر ترانزیستوری طول موج بالا برای دو نقطه بایاس متفاوت

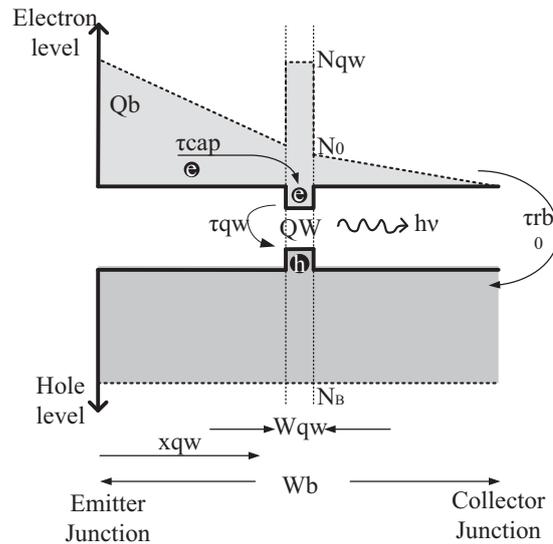
فصل سوم

مدلسازی لیزر ترانزیستوری

۱-۳: معرفی مدل

در این فصل مدلی برای لیزر ترانزیستوری به منظور دستیابی به پاسخ فرکانسی و سایر مشخصات این قطعه ارائه میشود. این مدل مبتنی بر مدل کنترل بار^۱ بوده و برای توصیف عملکرد لیزر ترانزیستوری از معادلات نرخ استفاده میکند. اطلاعات بیشتر در زمینه مدل کنترل بار در ضمیمه ۱ آورده شده است. شکل ۱-۳ توزیع حاملها را برای ناحیه بیس یک لیزر ترانزیستوری npn در بایاس مستقیم پیوند بیس-امیتر و بایاس معکوس بیس-کلکتور نمایش میدهد. همانطور که در شکل نمایش داده شده است، بازترکیب الکترونها و حفره ها در بیس با دو فرایند صورت میگیرد. (۱) بازترکیب مستقیم در خارج از چاه کوانتمی که با طول عمر τ_{rb0} صورت میگیرد. (۲) الکترونهايي که با ثابت زمانی τ_{cap} در چاه کوانتمی گرفتار شده و سپس درون چاه کوانتمی با طول عمر مؤثر τ_{qw}^{eff} با حفره ها بازترکیب میشوند. τ_{qw}^{eff} هنگامیکه جریان بیس زیر مقدار آستانه تابش لیزری باشد، برابر با طول عمر تابش خودبخودی (τ_{qw}) است و زمانیکه جریان بیس بیشتر از مقدار آستانه باشد از رابطه ۱-۳ به دست می آید. [12]

$$\tau_{qw}^{eff} = \left(1/\tau_{qw} + 1/\tau_{st}\right)^{-1} \quad (1-3)$$



شکل ۱-۳: مدل کنترل بار برای ناحیه بیس یک لیزر ترانزیستوری n-p-n

^۱ -charge control

در این رابطه τ_{st} طول عمر تابش القایی است که مقدار آن از رابطه ۳-۲ بدست می آید.

$$\tau_{st} = [\Omega N_p(t)]^{-1} \quad (2-3)$$

در این مدل، چاه کوانتمی یک سیستم دو ترازه فرض میشود که در آن بازترکیب بین الکترون و حفره تنها بین ترازهای پایه رخ میدهد. همچنین برای چاه کوانتمی یک فاکتور هندسی^۱ به نام ν مطابق با رابطه ۳-۳ تعریف میشود که مقدار بار حبس شده در چاه کوانتمی را به دست میدهد. فاکتور هندسی تابع عرض چاه کوانتمی (W_{qw})، عرض بیس (W_b) و فاصله چاه کوانتمی از پیوند بیس-امیتر میباشد.

$$\nu = \frac{W_{qw}}{W_b} \left(1 - \frac{x_{qw}}{W_b} \right) \quad (3-3)$$

الکترونیایی که در چاه کوانتمی محبوس میشوند سبب بروز ناپیوستگی در شیب منحنی چگالی الکترون میشوند. این ناپیوستگی در شیب، در محل چاه کوانتمی در شکل ۳-۱ مشخص است. اکنون با استفاده از معادلات نرخ زیر عملکرد لیزر ترانزیستوری را توصیف میکنیم:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\nu Q_b(t)}{\tau_{cap}} - \frac{n(t)}{\tau_{qw}} - \Omega[n(t) - n_{tr}]N_p(t) \quad (4-3)$$

$$\frac{dN_p(t)}{dt} = \Omega[n(t) - n_{tr}]N_p(t) + \frac{\theta n(t)}{\tau_{qw}} - \frac{N_p(t)}{\tau_p} \quad (5-3)$$

$$\frac{dQ_b(t)}{dt} = \frac{J(t)}{q} - \frac{Q_b(t)}{\tau_{rb}} \quad (6-3)$$

$$\frac{1}{\tau_{rb}} = \frac{1-\nu}{\tau_{rb0}} + \frac{\nu}{\tau_{cap}} \quad (7-3)$$

تمامی پارامترها و مقادیر فیزیکی به کار رفته در این مدل به طور خلاصه در جدول ۳-۱ معرفی شده اند. معادلات ۳-۴ و ۳-۵ معادلات نرخ مزدوج^۲ برای تقابل الکترون و فتون در ناحیه چاه کوانتمی است. در معادله ۳-۴ ترم $\nu Q_b(t)/\tau_{cap}$ مقدار بار محبوس در چاه کوانتمی را میدهد. $n(t)/\tau_{qw}$ نرخ بازترکیب خودبخودی الکترونها در چاه کوانتمی را بیان کرده و $\Omega[n(t) - n_{tr}]N_p(t)$ نرخ تابش القایی است. این

¹ -geometry factor

² -coupled rate equations

معادله نشان میدهد که مقدار تغییر در چگالی الکترونها برابر با بار محبوس در چاه کوانتومی منهای نرخ بازترکیب خودبخودی و القایی است.

جدول ۳-۱: تعریف پارامترها و مقادیر فیزیکی به کار رفته در مدل لیزر ترانزیستوری

Symbol	Definition	تعریف	Unit
n	Electron density	چگالی الکترونها	m^{-2}
n_0	Steady-state electron density	چگالی الکترونها در حالت ماندگار	m^{-2}
τ_{qw}	recombination lifetime via spontaneous emission in QW	طول عمر بازترکیب خودبخودی در QW	sec
τ_{st}	recombination lifetime via stimulated emission in QW	طول عمر بازترکیب القایی در QW	sec
τ_{qw}^{eff}	Effective recombination lifetime in QW	طول عمر بازترکیب مؤثر در QW	sec
ν	geometry factor	فاکتور هندسی	unitless
θ	Fraction of spontaneous emission	نسبت تابش خودبخودی	unitless
τ_{cap}	electron capture time in quantum well	زمان محبوس شدن الکترون در QW	sec
τ_{rb}	base charge life time	طول عمر حاملهای بیس	sec
τ_{rb0}	base charge bulk lifetime	طول عمر حاملها در بالک بیس	sec
τ_p	photon lifetime	طول عمر فوتون	sec
Ω	differential gain factor	ضریب بهره دیفرانسیل	$m^2 \cdot sec^{-1}$
n_{tr}	Transparency electron density	چگالی الکترون ترنسپرنسی	m^{-2}
N_p	Photon density	چگالی فوتونها	m^{-2}
N_{p0}	Steady state photon density	چگالی فوتونها در حالت ماندگار	m^{-2}
Q_b	Base charge density	چگالی بار بیس	Coul. m^{-2}
J	Base current density	چگالی جریان بیس	Amp. m^{-2}
J_0	DC component of base current density	چگالی جریان بیس در حالت ماندگار	Amp. m^{-2}
J_{th}	Threshold of base current density	مقدار آستانه چگالی جریان بیس	Amp. m^{-2}

در معادله ۳-۵، θ بیانگر نسبت تابش خودبخودی است که به موده‌های کاواک کوپل میگردد. اما از آنجا که در لیزرهای ترانزیستوری مورد بحث ما، ترم τ_{qw}/θ حداقل ۱۰۰ برابر بزرگتر از سایر ثابتهای زمانی معادلات است، در ادامه از ترم $\theta n(t)/\tau_{qw}$ صرفنظر میکنیم. ترم N_p/τ_{qw} نیز برابر با تلف فتونها میباشد، بنابراین معادله ۳-۵ بیان میکند که نرخ تغییر فتونها برابر با نرخ تابش القایی منهای تلف فتونها میباشد. معادله ۳-۶ که بیانگر معادله نرخ برای بار بیس است، از طریق ترم $vQ_b(t)/\tau_{cap}$ به معادله ۳-۴ مربوط میگردد. ترم $Q_b(t)/\tau_{rb}$ در این معادله بیانگر نرخ تلف بار در بیس میباشد. همچنین τ_{rb} که طول عمر حاملهای بیس است، از طریق معادله ۳-۷ به دست می آید.

۲-۳ آنالیز DC

با قرار دادن $dn(t)/dt=0$ ، $dN_p(t)/dt=0$ و $dQ_b(t)/dt=0$ در معادلات ۳-۴ الی ۳-۶ پاسخ حالت دائم به ازای جریان DC بیس برابر با J_0 به صورت زیر به دست می آید:

$$n_0 = n_{tr} + \frac{1}{\Omega \tau_p} \quad (۸-۳)$$

$$N_{p0} = n_0 \frac{\tau_p}{\tau_{qw}} \left(\frac{J_0}{J_{th}} - 1 \right) \quad (۹-۳)$$

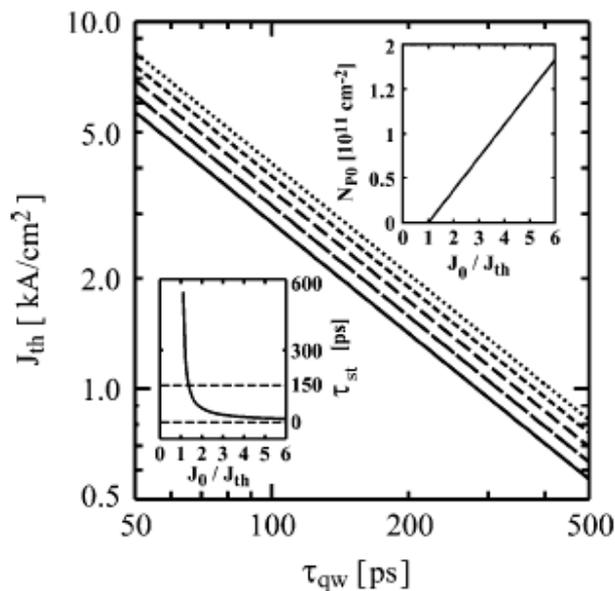
که در آن چگالی جریال آستانه (J_{th}) از رابطه زیر بدست می آید:

$$J_{th} = \frac{qn_0 \tau_{cap}}{v \tau_{qw} \tau_{rb}} = \frac{qn_0}{\tau_{qw}} \left[1 + \left(\frac{1}{v} - 1 \right) \frac{\tau_{cap}}{\tau_{rb0}} \right] \quad (۱۰-۳)$$

در عمل $\tau_{cap}/\tau_{rb0} \ll 1$ بنابراین $J_{th} \approx (qn_0/\tau_{qw}) [1 + \tau_{cap}/(v\tau_{rb0})]$. پانل اصلی شکل ۳-۲ چگالی جریان آستانه را به عنوان تابعی از τ_{qw} نمایش میدهد. مشاهده میشود که J_{th} در رنج kA/cm^2 میباشد. این شکل برای پنج مقدار متفاوت $\tau_{cap}=1, 2, 3, 4, 5ps$ به ترتیب از پایین به بالا رسم شده است. طول عمر

باز ترکیب برای تابش خودبخودی (τ_{qw}) و باز ترکیب آگر برای مقادیر آرایش بالا در محدوده 90-400ps می باشد، که در همان اندازه τ_{rb0} می باشد. سایر پارامترهای مدل به صورت زیر فرض شده اند:

$$\Omega = 0.5 \text{ cm}^2/\text{s} , N_{tr} = 10^{12} \text{ cm}^{-2} , \tau_p = 3.5 \text{ ps} , \tau_{rb0} = 150 \text{ ps} , v = 0.05$$



شکل ۲-۳: منحنی های چگالی جریان آستانه، چگالی فوتونها در حالت ماندگار و طول عمر باز ترکیب القایی لیزر ترانزیستوری

پانل بالایی شکل ۲-۳ مطابق انتظار وابستگی خطی N_{p0} به J_0/J_{th} را نشان داده و پانل پایینی طول عمر باز ترکیب القایی بر حسب چگالی جریان را نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود با افزایش J_0 ، τ_{st} کاهش می یابد. با توجه به روابط بیان شده نیز از آنجا که $N_{p0} \propto J_0$ و $\tau_{st} = [\Omega N_p]^{-1}$ با افزایش جریان بایاس، τ_{st} کاهش می یابد. به ازای $\tau_{st} < \tau_{qw} (=150\text{psec})$ نیز، باز ترکیب القایی غالب میشود. در پانلهای بالایی و پایینی شکل ۲-۳ علاوه بر مقادیر فرض شده در پانل اصلی مقادیر زیر نیز فرض میگردد:

$$\tau_{cap} = 1 \text{ ps} , \tau_{qw} = 150 \text{ ps} , J_{th} = 1.89 \text{ kA/cm}^2$$

۳-۳ آنالیز AC

در این بخش با اضافه کردن یک ورودی سیگنال کوچک سینوسی به جریان DC لیزر ترانزیستوری، آنالیز AC سیگنال کوچک آنرا انجام میدهیم. به این منظور داریم:

$$J_t = J_0 + \Delta J(t) \quad (11-3)$$

که با توجه به آنالیز فازوری:

$$\Delta J = \Delta J(\omega)e^{j\omega t} \quad (12-3)$$

$$\Delta n = \Delta n(\omega)e^{j\omega t} \quad (13-3)$$

$$\Delta N_p = \Delta N_p(\omega)e^{j\omega t} \quad (14-3)$$

$$\Delta Q_b = \Delta Q_b(\omega)e^{j\omega t} \quad (15-3)$$

با قراردادن معادلات ۱۲-۳ الی ۱۵-۳ در معادلات نرخ ۳-۴ الی ۳-۷، با فرض اینکه $|\Delta J(t)| \ll J_0$ ، و حل آنها در حوزه فازوری، نسبت تغییرات نرخ فتونها به تغییرات چگالی جریان را در حوزه فرکانس، به عنوان خروجی نوری $S(\omega)$ به صورت زیر بدست می آوریم:

$$S(\omega) = \frac{\Delta N_p(\omega)}{\Delta J(\omega)} = \frac{\Omega v N_{p0}}{q \tau_{cap}} \times \left\{ -j\omega^3 - \left(\frac{1}{\tau_{rb}} + \frac{1}{\tau_{qw}} + \Omega N_{p0} \right) \omega^2 + \left[\left(\frac{1}{\tau_{qw}} + \Omega N_{p0} \right) \frac{1}{\tau_{rb}} + \frac{\Omega N_{p0}}{\tau_p} \right] j\omega + \frac{\Omega N_{p0}}{\tau_p \tau_{rb}} \right\}^{-1} \quad (16-3)$$

معادله ۱۶-۳ را به صورت زیر میتوان به فرم ساده تر بازنویسی کرد:

$$S(\omega) = \left(\frac{1}{1 + i\omega\tau_{rb}} \right) \frac{A}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\omega\gamma} \quad (17-3)$$

که در آن:

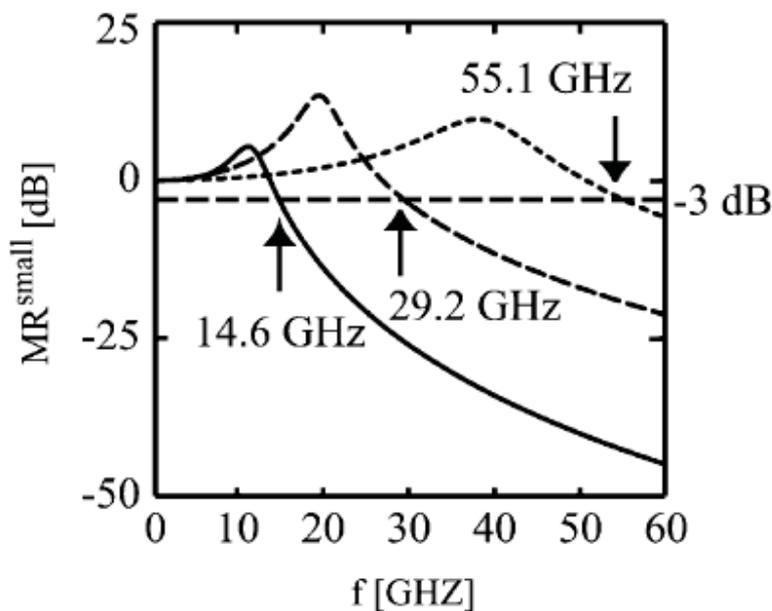
$$A = \frac{\Omega v N_{p0} \tau_{rb}}{q \tau_{cap}} \quad (18-3)$$

$$\omega_r^2 = \frac{\Omega N_{p0}}{\tau_p} \quad (19-3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau_{qw}} + \Omega N_{p0} \quad (20-3)$$

پاسخ فرکانسی مدلاسیون نوری سیگنال کوچک لیزر ترانزیستوری برابر با $|S(\omega)|$ است که با توجه به رابطه ۳-۱۷ به دست می آید و با $MR^{small}(\omega)$ نیز نمایش داده میشود. از این پس برای سادگی آنرا پاسخ فرکانسی نوری لیزر ترانزیستوری مینامیم. با توجه به این رابطه مشخص است که این پاسخ فرکانسی دارای یک قطب پایین گذر است که فرکانس آن توسط طول عمر حاملهای بیس (τ_{rb}) مشخص میگردد. باید توجه کرد که مطابق با رابطه ۳-۷ زمان محبوس شدن الکترونها در چاه کوانتمی (τ_{cap})، نقش بسزایی در تعیین τ_{rb} دارد. به همین دلیل محل چاه کوانتمی که τ_{cap} را مشخص میکند، تأثیر بسزایی در تعیین پاسخ فرکانسی دارد. [13]

شکل ۳-۳ پاسخ فرکانسی نوری سه لیزر ترانزیستوری مختلف را که با استفاده از رسم معادله ۳-۱۷ به دست آمده است، نمایش میدهد.



شکل ۳-۳: پاسخ فرکانس نوری ۳ نمونه لیزر ترانزیستوری به دست آمده توسط مدل مطرح شده

در این شکل پارامترهای مدل لیزر ترانزیستوری به صورت زیر فرض شده اند.

برای منحنی تیره با فرکانس قطع 14.6GHz :

$$\tau_{qw} = 150 \text{ ps}, \quad \tau_p = 3.5 \text{ ps}, \quad \tau_{cap} = 1 \text{ ps}, \quad v = 0.05, \quad J_0 = 2J_{th} = 2.78 \text{ kA/cm}^2$$

برای منحنی خط چین با فرکانس قطع 29.2GHz :

$$\tau_{qw} = 100 \text{ ps}, \quad \tau_p = 1 \text{ ps}, \quad \tau_{cap} = 0.5 \text{ ps}, \quad v = 0.2, \quad J_0 = 2J_{th} = 9.72 \text{ kA/cm}^2$$

برای منحنی نقطه چین با فرکانس قطع 55.1GHz :

$$\tau_{qw} = 100 \text{ ps}, \quad \tau_p = 1 \text{ ps}, \quad \tau_{cap} = 0.5 \text{ ps}, \quad v = 0.2, \quad J_0 = 5J_{th} = 24.3 \text{ kA/cm}^2$$

و برای هر سه منحنی:

$$\Omega = 0.5 \text{ cm}^2/\text{s}, \quad N_{tr} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}, \quad \tau_{rb0} = 150 \text{ ps}$$

فصل چهارم

بهبود عرض بیس در لیزرهای ترانزیستوری با ساختار

InGaP/GaAs

۱-۴ : ساختار لیزر ترانزیستوری

شکل ۱-۴ ساختار لایه های مختلف لیزر ترانزیستوری مورد تحلیل در این بخش را نمایش میدهد. [4] همانطور که مشاهده میشود بر روی بستر یک لایه GaAs به شدت آرایش یافته به ضخامت 5000\AA قرار داده شده است که نقش لایه بافر را ایفا میکند.

بالای این لایه یک سری لایه غلاف^۱ قرار داده شده است که برای حبس فتونها و همچنین حبس حاملها می باشد. قسمت غلاف تحتانی از ۳ لایه زیر تشکیل شده است:

n-Al_{0.40}Ga_{0.60}As به ضخامت 600\AA

n-Al_{0.98}Ga_{0.02}As به ضخامت 5000\AA

n-Al_{0.40}Ga_{0.60}As به ضخامت 150\AA

در بالای این لایه ها لایه سابکلکتور قرار دارد که از n-GaAs به شدت آرایش یافته با ضخامت 200\AA تشکیل شده است. پس از سابکلکتور لایه کلکتور از جنس GaAs بدون آرایش و با ضخامت 600\AA قرار داده شده است.

بالای لایه کلکتور لایه بیس و جود دارد که خود بیس نیز شامل سه قسمت میباشد :

- بخش پایینی بیس از جنس p⁺-GaAs به ضخامت 210\AA که آرایش آن به صورت تدریجی از پایین به بالا از $8*10^{18}\text{cm}^{-3}$ تا $9*10^{19}\text{cm}^{-3}$ تغییر میکند.

- چاه کوانتومی از جنس InGaAs بدون آرایش به ضخامت 160\AA

- بخش فوقانی بیس از جنس p⁺-GaAs به ضخامت 510\AA که آرایش آن به صورت تدریجی از پایین به بالا از $1*10^{19}\text{cm}^{-3}$ تا $4*10^{19}\text{cm}^{-3}$ تغییر میکند.

^۱ - Cladding

در بالای بیس لایه امیتر قرار دارد که از جنس $n\text{-In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ به ضخامت 250\AA می باشد. در بالای امیتر لایه های غلاف فوقانی قرار دارند که همانند غلاف تحتانی با هدف حبس فتونها و حاملها طراحی شده اند. غلاف تحتانی از ۵ بخش زیر تشکیل شده است:

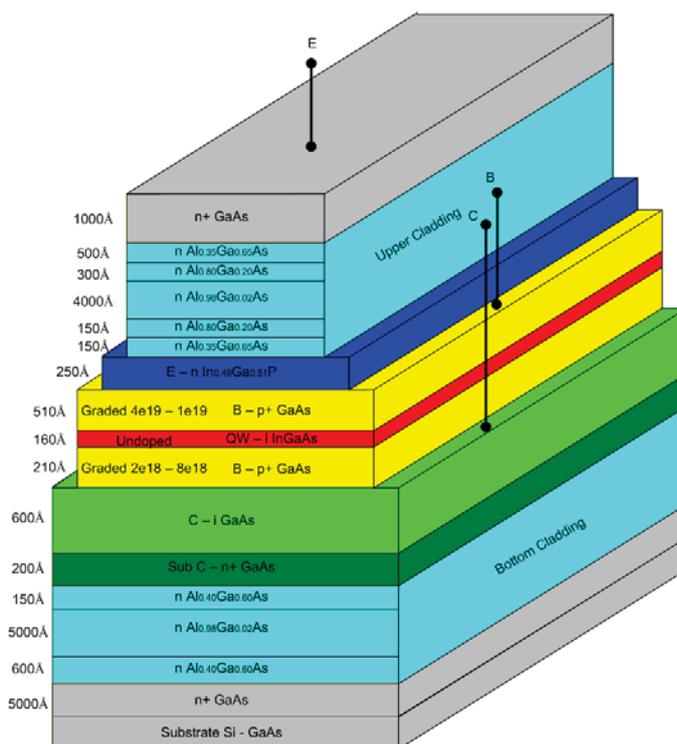
150\AA $n\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ به ضخامت

150\AA $n\text{-Al}_{0.80}\text{Ga}_{0.20}\text{As}$ به ضخامت

4000\AA $n\text{-Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ به ضخامت

300\AA $n\text{-Al}_{0.80}\text{Ga}_{0.20}\text{As}$ به ضخامت

500\AA $n\text{-Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ به ضخامت



شکل ۴-۱: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستوری مطرح شده در این بخش

در بالای غلاف فوقانی نیز لایه کلاهدک از جنس GaAs نوع n به شدت آلیش یافته به ضخامت 1000\AA قرار دارد. این لیزر در دمای محیط (300°K) عمل کرده و طول موج آن با توجه به جنس لایه

بیس و جنس چاه کوانتومی، حدود $\lambda \sim 1006\text{nm}$ میباشد. در این فصل تاثیر تغییر عرض بیس این قطعه بر پاسخ فرکانسی نوری و بهره جریان آن بررسی شده و برای داشتن حداکثر پهنای باند نوری، عرض بیس بهینه آن محاسبه میگردد. برای ساخت لیزر ترانزیستوری نمایش داده شده در شکل ۴ ابتدا تمامی لایه ها با ضخامتهای نشان داده شده در این شکل با استفاده از روش MOCVD لایه نشانی میشوند. پس از آنکه تمامی لایه ها تشکیل گردید از ۸ ماسک مختلف برای ۳ مرحله شستشوی شیمیایی مرطوب، ۳ مرحله شستشوی شیمیایی خشک و ۳ مرحله متالیزه برای ایجاد اتصالات استفاده میگردد. [14]

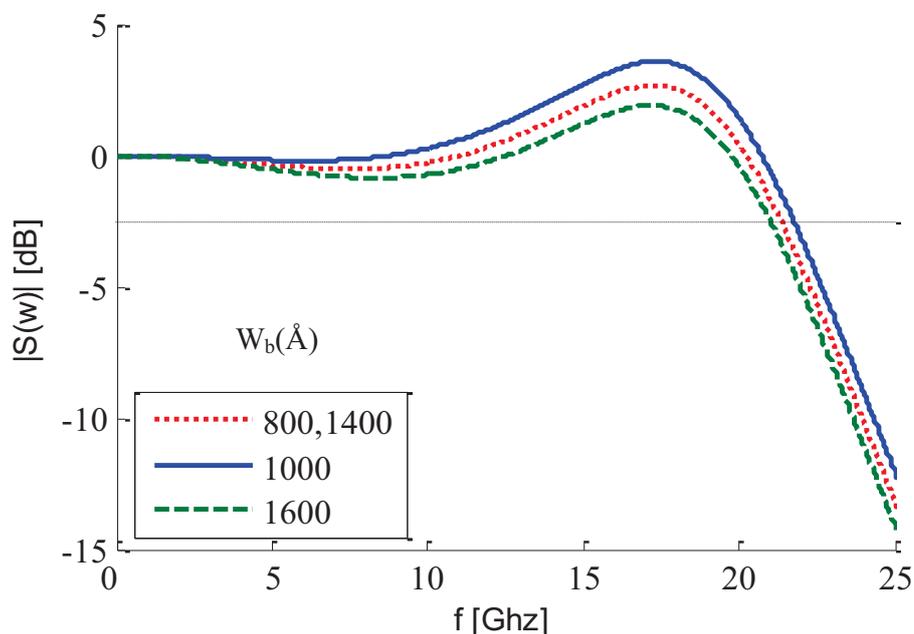
۴-۲: تاثیر عرض بیس بر پاسخ فرکانسی نوری

در این بخش با تغییر عرض بیس لیزر ترانزیستوری مطرح شده در بخش ۴-۱ و ثابت نگاه داشتن سایر پارامترهای این قطعه، تاثیر تغییر این پارامتر بر پاسخ فرکانسی مطالعه میگردد. برای بدست آوردن پاسخ فرکانسی نوری، مدل مطرح شده در فصل سوم به کار گرفته میشود. پارامترهای این مدل برای لیزر ترانزیستوری مطرح شده در این بخش در جدول ۴-۱ خلاصه شده اند.

جدول ۴-۱: پارامترها و مقادیر فیزیکی برای لیزر ترانزیستوری مطرح شده در فصل چهارم

Symbol	Value	Unit
W_b	880	Å
W_{qw}	160	Å
x_{qw}	510	Å
τ_{qw}	100	psec
τ_{cap}	1	psec
τ_{rb0}	150	psec
τ_p	3.5	psec
Ω	0.5	$\text{cm}^2.\text{sec}^{-1}$
N_{tr}	10^{12}	cm^{-2}
J	$3 \times J_{th}$	Amp. cm^{-2}

این پارامترها در مرجع [12] آورده شده اند و ما نیز از آنها استفاده میکنیم. اما در فصل پنجم که تحلیلها بر نوع دیگری از لیزرهای ترانزیستوری انجام میگردد. روش بدست آورد تمامی این پارامترها استخراج شده و بیان میگردد. در شکل ۲-۴ منحنی پاسخ فرکانسی نوری لیزر ترانزیستوری برای عرض بیهیهای متفاوت رسم شده است. در این شکل مشاهده میگردد که با افزایش عرض بیس از 800\AA به 1000\AA پاسخ فرکانسی بهبود یافته است و پهنای باند نیز افزایش پیدا کرده است، اما با افزایش بیشتر از 1000\AA به مقادیر 1400\AA و 1600\AA مجدداً پهنای باند کاهش یافته است.

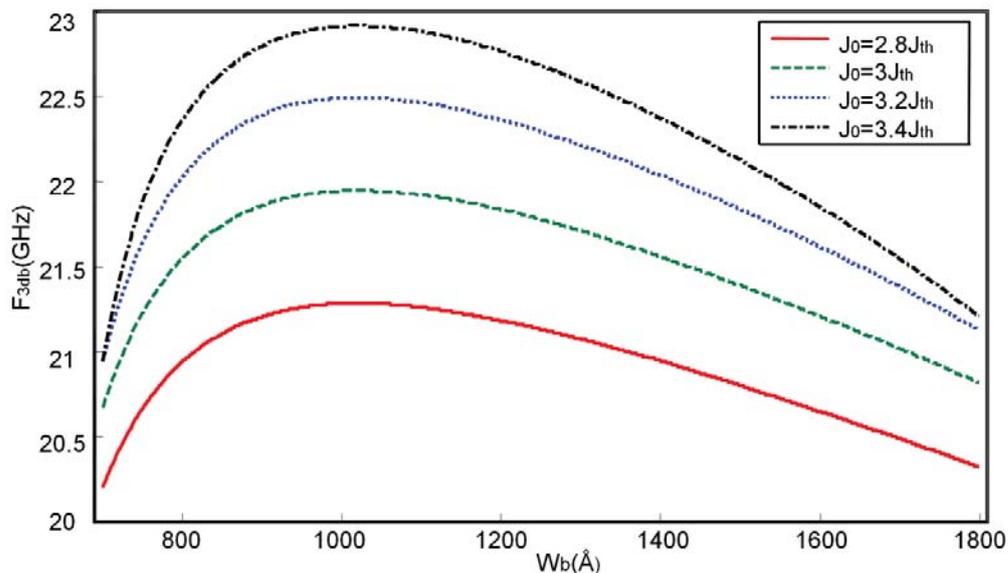


شکل ۲-۴: پاسخ فرکانسی نوری لیزر ترانزیستوری برای عرض بیهیهای مختلف

بدین ترتیب میتوان گفت برای رسیدن به حداکثر پهنای باند، عرض بیس بهینه ای برای لیزر ترانزیستوری وجود دارد که این عرض بیس برای لیزر ترانزیستوری مطرح شده در این بخش در حدود 1000\AA میباشد. نکته ای که در اینجا باید مورد توجه واقع شود، پیک رزونانس پاسخ فرکانسی نوری است. در شکل ۲-۴ مشاهده میشود که با نزدیک کردن عرض بیس به مقدار بهینه (1000\AA) پیک رزونانس نیز همراه با پهنای باند افزایش پیدا میکند. پیک رزونانس در پاسخ فرکانسی برای لیزرهای ترانزیستوری یک

نکته منفی محسوب میشود، بنابراین در حقیقت در اینجا مصالحه ای بین پهنای باند و اندازه پیک رزونانس وجود دارد. البته با توجه به اینکه پیک رزونانس در این لیزر ترانزیستوری کوچک است (زیر 5dB) این عامل کمتر مشکل ساز است. اما همانطور که در فصل بعد بیان خواهد شد این عامل در لیزرهای ترانزیستوری با طول موج بالا مشکل جدی تر به حساب می آید.

برای بررسی دقیقتر، پهنای باند نوری لیزر ترانزیستوری، یعنی فرکانسی که در آن $|S(\omega)|$ برابر با -3dB میشود، برحسب عرض بیس در شکل ۳-۴ رسم شده است. در این شکل وجود نقطه بهینه برای عرض بیس واضح است. همچنین از آنجا که منحنی های مختلف این شکل که برای جریانهای بایاس متفاوت رسم شده اند، همگی دارای نقطه بهینه یکسان هستند، میتوان گفت که نقطه بهینه عرض بیس مستقل از بایاس نیز میباشد.



شکل ۳-۴: پهنای باند نوری لیزر ترانزیستوری بر حسب عرض بیس برای مقادیر مختلف جریان بایاس

۳-۴: تأثیر عرض بیس بر بهره جریان

بهره جریان در لیزرهای ترانزیستوری مشابه با ترانزیستورهای دوقطبی با نسبت جریان کلکتور به جریان بیس تعریف میشود. در لیزرهای ترانزیستوری نیز حاملهای اقلیتی که با گذر از عرض بیس خود

را به کلکتور می‌رسانند، جریان کلکتور را تشکیل داده و هرچه تعداد این حاملها بیشتر باشد، بهره جریان لیزر ترانزیستوری افزایش می‌یابد. مشابه با ترانزیستورهای HBT در اینجا نیز با استفاده از رابطه (۱-۴) بهره جریان را محاسبه میکنیم: [15]

$$\beta = \frac{\tau_{rb}}{\tau_t} \quad (1-4)$$

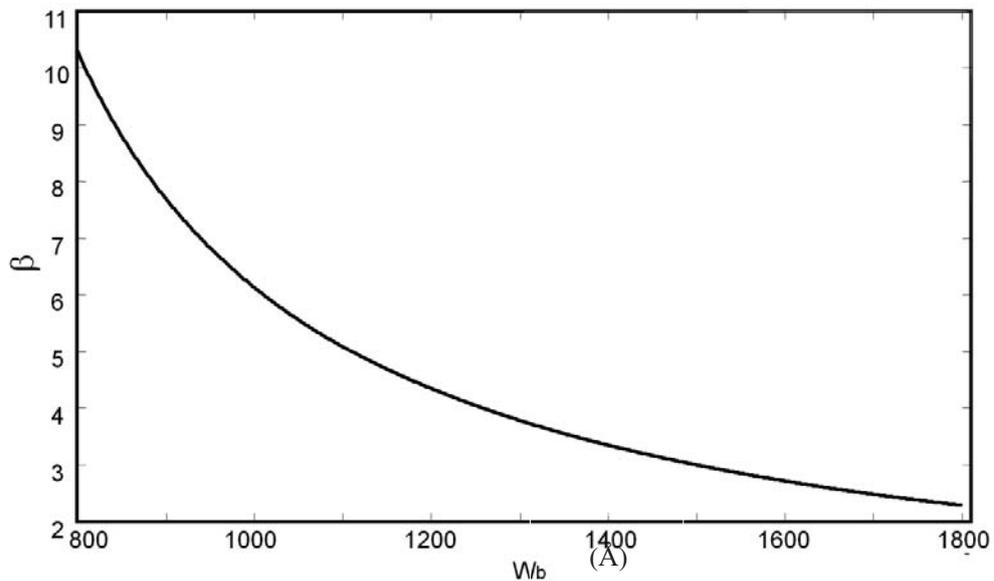
در این رابطه τ_{rb} طول عمر حاملهای بیس است که در رابطه (۷-۳) تعریف شد. τ_t نیز زمان گذار از عرض بیس است که با فرض یکنواخت بودن جنس بیس با استفاده از رابطه (۲-۴) به دست می‌آید. با توجه به اینکه تغییر در جنس لایه‌های تشکیل دهنده بیس جزئی بوده و تغییر کمی در D ایجاد میکند، فرض فوق قابل قبول میباشد.

$$\tau_t = \frac{W_b^2}{2D} \quad (2-4)$$

با قرار دادن τ_t به دست آمده از رابطه (۲-۴) در رابطه (۱-۴) میتوان رابطه ای برای بهره جریان، مطابق با رابطه (۳-۴) رسید:

$$\beta = \frac{\tau_{rb} \times 2D}{W_b^2} \quad (3-4)$$

برای تحلیل تأثیر عرض بیس بر بهره جریان لیزر ترانزیستوری میتوان از رابطه (۳-۴) استفاده کرد. البته باید توجه داشت که علاوه بر ترم W_b موجود در مخرج رابطه (۳-۴)، ترم τ_{rb} در صورت رابطه نیز همانطور که در رابطه (۷-۳) مطرح شده است، تابع v و متعاقباً تابع W_b میباشد. شکل ۴-۴ منحنی بهره جریان لیزر ترانزیستوری بر حسب عرض بیس را نمایش میدهد.



شکل ۴-۴: بهره جریان لیزر ترانزیستوری بر حسب عرض بیس

همانطور که در این شکل مشاهده میشود با افزایش عرض بیس بهره جریان کاهش می یابد. البته از آنجا که با افزایش عرض بیس حاملهای کمتری میتوانند از عرض بیس عبور کرده و خود را به کلکتور برسانند این نتیجه قابل انتظار نیز بود. اطلاعات بیشتر در مورد مطالعات انجام شده در این بخش در مقاله چاپ شده در مجموعه مقالات کنفرانس NUSOD آمده است. [16]

فصل پنجم

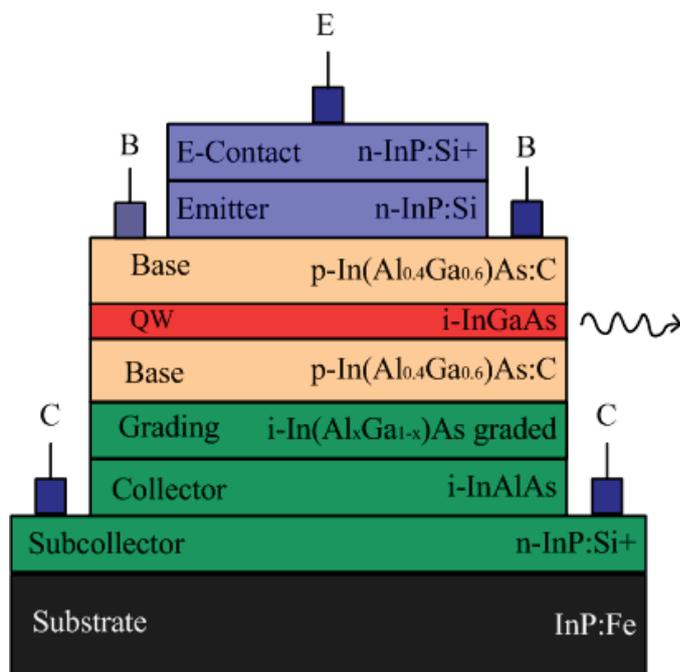
تحلیل پاسخ فرکانسی لیزرهای ترانزیستوری

طول موج بالا

۱-۵: لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا

شکل ۱-۵ شمای ساختار لایه ای یک لیزر ترانزیستوری طول موج بالا که در طول موج $1.56\mu\text{m}$ کار میکند را نمایش میدهد. همانطور که مشاهده میشود بیس این لیزر ترانزیستوری از جنس $\text{In}(\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6})\text{As}$ با ناخالصی کربن به عنوان ناخالصی دهنده و چاه کوانتمی آن از جنس InGaAs بدون آرایش میباشد. تغییر جنس بالک بیس و چاه کوانتمی سبب شده است که طول موج تولیدی این لیزر ترانزیستوری تغییر کرده و به مقدار $1.56\mu\text{m}$ برسد که به طول موج $1.55\mu\text{m}$ بسیار نزدیک است. همانطور که بیان شد طول موج $1.55\mu\text{m}$ در سیستمهای فیبر نوری کمترین تلف را داشته و به همین دلیل بسیار حائز اهمیت است. گزارش ساخت این لیزر ترانزیستی در ژانویه سال ۲۰۱۱ ارائه شده است. [17]

جنس امیتر این لیزر ترانزیستوری از InP بوده و سایر لایه های آن نیز در شکل ۱-۵ آورده شده است. البته این لیزرهای ترانزیستوری هنوز در ابتدای راه بوده و مشکلات عمده ای از جمله داشتن



شکل ۱-۵: ساختار لایه ای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا

material gain پایین، آرایش پذیری مشکل و inter-valance band absorption بالا، را در پیش رو دارد. [18] در این فصل برای اولین بار شیوه محاسبه پاسخ فرکانسی این لیزر ترانزیستوری ارائه شده، به مشکلات پاسخ فرکانسی آن ارائه شده و تأثیر تغییر عرض چاه کوانتومی و عرض بیس بر پاسخ فرکانسی آن بررسی می‌گردد.

۲-۵: تعیین پارامترهای مدل برای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا

مدل تعریف شده در فصل سوم برای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا نیز صادق است، ما از آنجا که تاکنون این نوع لیزرها مورد تحلیل فرکانسی قرار نگرفته اند، پارامترهای این مدل برای لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا به دست نیامده است. در این بخش تمامی پارامترهای مدل را برای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا بر حسب مشخصات فیزیکی لیزر ترانزیستوری بدست آورده و بدین وسیله برای اولین بار تحلیل کامل پاسخ فرکانسی نوری برای لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا را ارائه می‌کنیم. این پارامترها به طور خلاصه در جدول ۴-۱ معرفی شده اند.

جدول ۴-۱: پارامترهایی از مدل لیزر ترانزیستوری که با توجه به مشخصات فیزیکی این قطعه بدست می‌آیند

Symbol	Definition	تعریف	Unit
τ_{qw}	recombination lifetime via spontaneous emission in QW	طول عمر بازترکیب خودبخودی در QW	sec
τ_{cap}	electron capture time in quantum well	زمان محبوس شدن الکترون در QW	sec
τ_{rb0}	base charge bulk lifetime	طول عمر حاملها در بالک بیس	sec
τ_p	photon lifetime	طول عمر فوتون	sec
Ω	differential gain factor	ضریب بهره تفاضلی	$m^2 \cdot sec^{-1}$
n_{tr}	Transparency electron density	چگالی الکترون ترنسپرنسی	m^{-2}

۱-۲-۵: τ_{qw}

تولید نور از حاملهای الکتریکی همواره از وقوع یک گذار بین ترازهای اولیه و ثانویه ایجاد میگردد. میدان مغناطیسی که سبب این پدیده میشود را با اختلال^۱ وابسته به زمان \tilde{H} نمایش میدهند. نرخ گذار بین تراز الکتریکی اولیه و ثانویه با استفاده از قانون طلایی فرمی به شکل زیر بدست می آید: [19]

$$\frac{1}{\tau_{qw}} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_f \left| \langle f | \tilde{H} | i \rangle \right|^2 \delta(E_f^c - E_i^c + \hbar\omega) \quad (1-5)$$

در رابطه بالا انرژی سطوح اولیه و ثانویه، مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی حاملها است. طول عمر بازترکیب خودبخودی واقعی از جمع کردن رابطه (۱-۵) روی تمامی مدهای فتونها به دست می آید اما با استفاده از یک تقریب مناسب میتوان نوشت: [20]

$$\frac{1}{\tau_{qw}} = \frac{q^2 \omega}{4\epsilon m^* c^2 W_{qw}} O_{if} \quad (2-5)$$

که در آن O_{if} قدرت اسیلاتور^۲ بوده و توسط رابطه (۳-۵) به دست می آید: [21]

$$O_{if} = \frac{2m^* \omega}{\hbar} \left| \langle \psi_i | z | \psi_f \rangle \right|^2 \quad (3-5)$$

در این رابطه ω فرکانس زاویه ای نور، ψ_i و ψ_f توابع موج سطوح اولیه و ثانویه و z متغیر مکان میباشد. همچنین m^* جرم مؤثر کاهش یافته است که توسط رابطه (۴-۵) به دست می آید:

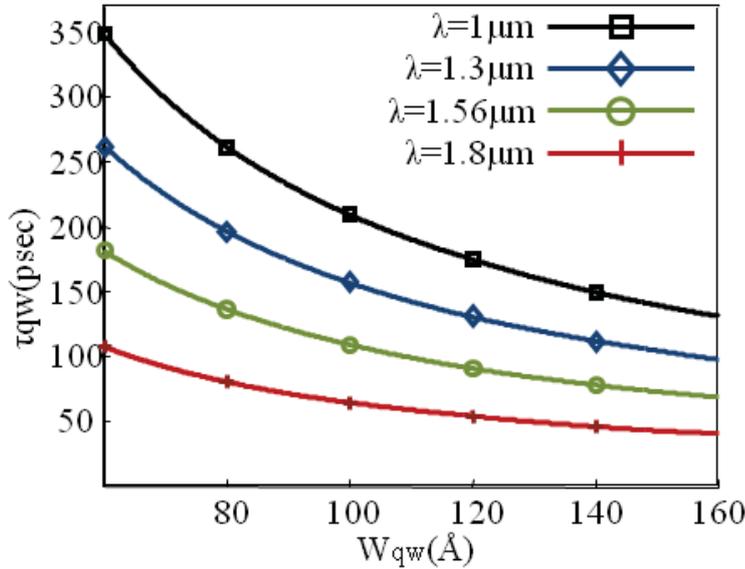
$$m^* = \frac{m_e^* \times m_h^*}{m_e^* + m_h^*} \quad (4-5)$$

در رابطه (۴-۵) m_e^* و m_h^* جرم مؤثر الکترون و حفره میباشد. بنابراین با قراردادن روابط (۳-۵) و (۴-۵) در رابطه (۲-۵) میتوان طول عمر بازترکیب خودبخودی یعنی همان τ_{qw} را محاسبه نمود. همانطور که در روابط مشخص شده است، عرض چاه و جنس ماده عوامل تأثیر گذار بر τ_{qw} میباشد. جنس ماده

¹ -Perturbation

² -Oscillator strength

علاوه بر تغییر توابع موج، با تغییر دادن طول موج نور تولیدی نیز بر τ_{qw} تأثیر میگذارد. شکل (۲-۵) منحنی τ_{qw} بر حسب عرض چاه را برای طول موجهای تولیدی مختلف نشان میدهد.



شکل ۲-۵: طول عمر بازترکیب خودبخودی بر حسب عرض چاه کوانتومی برای طول موجهای مختلف

τ_{cap}: ۲-۲-۵

زمان محبوس شدن الکترون در چاه کوانتومی (τ_{cap}) برابر با مدت زمان عبور الکترون از اتصال بیس امیتر تا چاه کوانتومی میباشد. (به شکل ۳-۱ توجه کنید.) از آنجا که ثابت نفوذ در کل ناحیه بیس تقریباً ثابت فرض میشود، میتوان نوشت: [22],[23]

$$\tau_{cap} = \frac{x_{qw}}{2D} \quad (۵-۵)$$

که همانطور که در فصل سوم بیان شد x_{qw} برابر با فاصله اتصال بیس-امیتر تا چاه کوانتومی میباشد.

τ_{rb0}: ۲-۲-۵

طول عمر حاملها در بالک بیس (τ_{rb0}) به معنی طول عمر بازترکیب حاملها در ناحیه بیس به غیر از چاه کوانتومی میباشد. تجربه نشان میدهد که این زمان متناسب با عکس آرایش بیس است. همچنین

ضریب تناسب بسته به جنس ماده است که آنرا ضریب بازترکیب تابشی بای مولکولی¹ نامیده و با B_{rad} نمایش میدهند. بنابراین τ_{rb0} را میتوان با استفاده از رابطه (۵-۶) محاسبه کرد. [23],[24]

$$\tau_{rb0} = \frac{1}{B_{rad} N_B} \quad (۵-۶)$$

مقدار B_{rad} برای GaAs برابر با $1.9 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ گزارش شده است [23]. از آنجا که خود رابطه (۵-۶) نیز خصوصاً در مقادیر آرایش بالا رابطه تقریبی است میتوان با خطای قابل قبولی همین مقدار را برای InAlGaAs که در این ساختار به کار رفته نیز به کار برد.

τ_p : ۵-۲-۴

طول عمر فتونها که با τ_p نمایش داده میشود متناسب با عکس تلف کاواک میباشد. تلف داخل کاواک نیز برابر با مجموع تلف آینه ها و جذب فتون در داخل کاواک است که با α_i نمایش داده میشود. بنابراین میتوان τ_p را با استفاده از رابطه (۵-۷) بدست آورد: [5],[18]

$$\frac{1}{\tau_p} = \left(\frac{c}{n_r} \right) \left[\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (۵-۷)$$

در این رابطه c سرعت نور در خلاء، n_r ضریب شکست ماده، L طول کاواک و R_1 و R_2 ضرایب بازتابش آینه های دو طرف کاواک میباشد. با توجه به اینکه در دو طرف کاواک آینه وجود ندارد، ضرایب بازتابش با استفاده از معادلات فرنل، برای بازتابش بین هوا و InAlGaAs که ناحیه بیس بوده و نقش موجبر را نیز بازی میکند، مطابق با رابطه (۵-۸) به دست می آید: [24]

$$R_1 = R_2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (۵-۸)$$

در رابطه (۵-۸)، n_1 و n_2 ضریب شکست InAlGaAs و هوا میباشد. مقدار جذب فتون (α_i) نیز از رابطه (۵-۹) بدست می آید: [18]

$$\alpha_i = (\Gamma_{WG} + \Gamma_{QW}) k_p N_B \quad (۵-۹)$$

¹ - Bimolecular radiative recombination coefficient

در این رابطه Γ_{QW} و Γ_{WG} به ترتیب فاکتور حبس نور^۱ برای موجبر (که در اینجا بیس ترانزیستور است) و چاه کوانتومی میباشد. N_B مقدار آرایش بیس و k_p ضریب intervalence band absorption است. [25]

$$\Omega, n_{tr} : 5-2-5$$

با دقت در رابطه (۳-۴) در فصل سوم در می یابیم که ترم $N_p(t) [n(t) - n_{tr}]$ نرخ تابش القایی است. Ω و n_{tr} در حقیقت برای تقریب زدن بهره نوری با یک خط به کار میروند. نرخ تابش القایی (R_{st}) از رابطه (۵-۱۰) بدست می آید. [26]

$$R_{st} = \frac{c}{n_r} g N_p \quad (10-5)$$

مشاهده میشود که در این رابطه N_p در بهره نوری (g) و سرعت نور در ماده ضرب شده است. بهره نوری را میتوان از رابطه (۵-۱۱) بدست آورد.

$$g = \frac{h\lambda^2 m^*}{2n_r^2 \tau_{qw} W_{qw}} (1 - e^{-N_{QW}/N_c} - e^{-N_B/N_V}) \quad (11-5)$$

در این رابطه N_c و N_V چگالی سطوح هدایت و ظرفیت و N_{QW} چگالی حاملهای محبوس در چاه کوانتومی است که از رابطه (۵-۱۲) بدست می آید. سایر پارامترهای معادله (۵-۱۱) نیز در گذشته تعریف شده اند. [18]

$$N_{QW} = \frac{\tau_{esc}}{\tau_{cap}} N_0 \quad (12-5)$$

در رابطه (۵-۱۲) τ_{esc} طول عمر فرار حاملها^۲ است، که معمولاً مرتبه لگاریتمی بزرگتر از τ_{cap} است [27]. N_0 نیز چگالی حاملهای غیر محبوس در اطراف چاه کوانتومی است که با توجه به شرایط مرزی و بایاس اتصال بیس امیتر و بیس کلکتور مشخص میگردد. در شکل (۳-۱) مفهوم N_{QW} و N_0 به روشنی نمایش داده شده است. معادله (۵-۱۱) نشان میدهد که g تابعی نمایی از N_B میباشد، اما در اکثر

¹- optical confinement factor

²- carrier thermionic escape lifetime

کاربردها با توجه به اینکه تنها بخش کوچکی از این تابع مورد توجه قرار میگیرد میتوان آنرا با یک تابع خطی به شکل معادله (۱۳-۵) تقریب زد:

$$g = a(n - n_{tr}) \quad (13-5)$$

در این رابطه n_{tr} را transparency carrier density نامیده و a را که در حقیقت شیب منحنی بهره نوری است، ضریب بهره دیفرانسیل مینامیم. حال با توجه به رابطه (۱۰-۵) که نشان میدهد نرخ تابش القایی متناسب با $(c/n_r)*g$ است، $\Omega = (c/n_r)*a$ و بدین صورت میتوان نوشت:

$$R_{st} = \Omega(n(t) - n_{tr})N_p \quad (14-5)$$

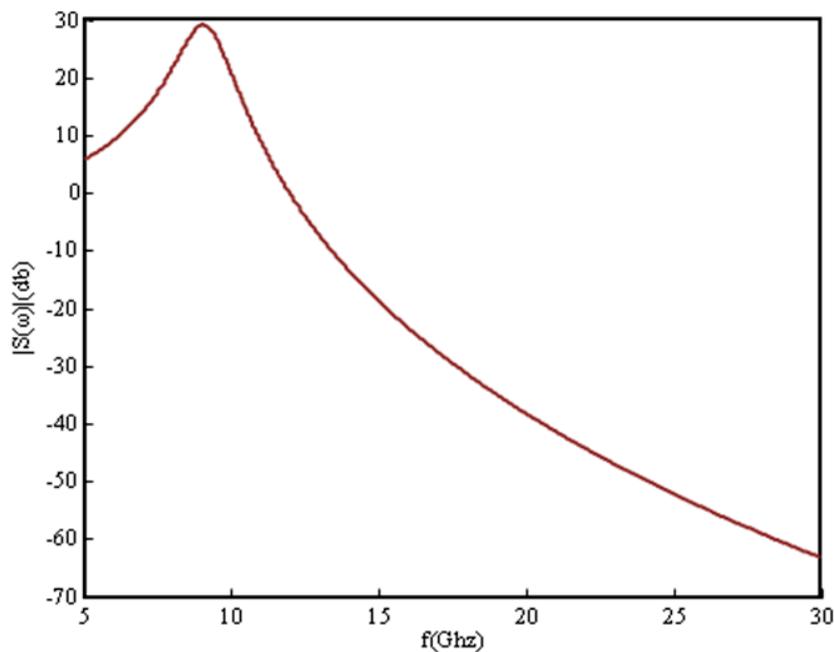
۳-۵: تعیین پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا

در این بخش پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا محاسبه میگردد. برای این کار پارامترهای مطرح شده در بخش ۲-۵ برای این لیزر محاسبه شده و سپس این پارامترها در مدل مطرح شده در فصل سوم قرار داده میشود. تمامی پارامترهای فیزیکی لازم برای محاسبات پاسخ فرکانسی این لیزر در جدول (۱-۵) خلاصه شده اند.

جدول ۲-۵: پارامترهای فیزیکی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا مطرح شده در فصل پنجم

Symbol	Definition	Value	Unit
W_b	base width	108	nm
W_{qw}	quantum well width	80	Å
x_{qw}	distance from emitter junction to QW	500	Å
λ	Wavelength	1.56	μm
T	Temperature	77	K
N_b	base doping	1×10^{19}	cm ⁻³
n_r	refractive index	3.34	unitless
k_p	intervalence band absorption	4×10^{-17}	cm ²
Γ_{WG}	waveguide optical confinement factor	0.1	unitless
Γ_{QW}	quantum well optical confinement factor	0.01	unitless
R_1, R_2	facet reflectivity	0.3	unitless
L	cavity length	800	μm
D	diffusion constant across base region	26	cm ² /sec
N_c	density of states of conduction bands	7×10^{17}	cm ⁻³
N_v	density of states of valance bands	3×10^{18}	cm ⁻³

شکل ۳-۵ پاسخ فرکانسی به دست آمده برای این لیزر را نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود پهنای باند نوری این لیزر 12.3GHz بوده که نسبت به لیزرهای ترانزیستوری معمول که در طول موج $1\mu\text{m}$ کار میکنند و در فصل چهارم به آنها پرداخته شد پایتتر میباشد. البته مشکل بزرگ دیگری که در این پاسخ فرکانسی وجود دارد پیک رزونانس بالای آن در حوالی 9GHz است. این مقدار پیک رزونانس که در اینجا به حدود 29dB میرسد، بدون شک در هنگام مدلاسیون اطلاعات بر روی لیزر ایجاد مشکل کرده و رنج فرکانسی قابل قبول آنرا کمتر از 12.3GHz نیز میکند. البته این پیک رزونانسی در دیوهای لیزری که مقدمه ای برای لیزرهای ترانزیستوری بودند نیز وجود داشت اما در آنجا پیک رزونانس در حدود 5dB بود، و در لیزرهای ترانزیستوری نسل اول در طول موج $1\mu\text{m}$ نیز همانطور که در فصل چهارم بیان شد یا به کلی پیک رزونانس وجود نداشت یا کمتر از 5dB بود. [22] به همین دلیل کاهش پیک رزونانس مهمترین کاری است که برای بهبود پاسخ فرکانسی این لیزر ترانزیستوری باید انجام گیرد.



شکل ۳-۵: پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا

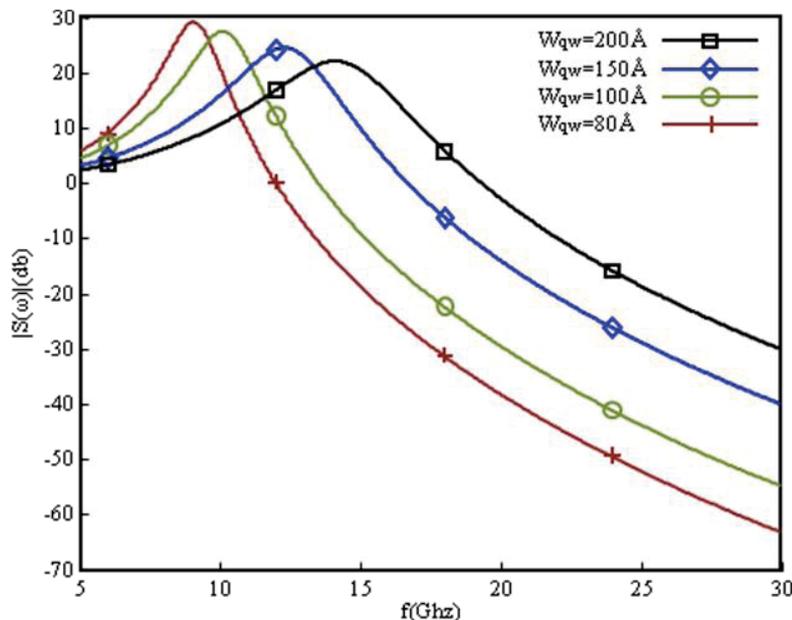
بررسی های انجام شده در این پروژه نشان می‌دهد که مهمترین عامل وجود این پیک رزونانس در لیزر ترانزیستوری طول موج بالا، ضریب بهره دیفرانسیل (Ω) پایین در این لیزرهای ترانزیستوری نسبت به

نمونه های لیزرهای سابق در طول موج $1\mu\text{m}$ است. با توجه به روابط بخش ۵-۲-۵، مقدار Ω برای این لیزر ترانزیستوری طول موج بالا برابر با $9.7 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ محاسبه شد که در مقایسه با عدد $0.5 \text{cm}^2/\text{s}$ برای لیزرهای ترانزیستوری سابق حدود ۵۰ برابر کوچکتر است. [12]

از آنجا که تغییر Ω تنها با تغییر دادن ماده بیس و چاه کوانتومی میسر است و از طرفی برای داشتن لیزر ترانزیستوری با طول موج نزدیک به $1.55\mu\text{m}$ ترجیح می‌دهیم که جنس مواد را تغییر ندهیم، بنابراین باید به دنبال راه حل دیگری برای کاهش پیک رزونانس پاسخ فرکانسی نوری در لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا باشیم. در ادامه نشان می‌دهیم که عرض چاه کوانتومی می‌تواند تأثیر بسزایی در اندازه پیک رزونانس داشته باشد.

۵-۴: بررسی تأثیر عرض چاه کوانتومی بر پاسخ فرکانسی لیزر طول موج بالا

شکل ۵-۴ پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری مطرح شده در این بخش را به ازای چهار مقدار مختلف عرض چاه کوانتومی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش عرض چاه از مقدار اولیه 80\AA به سمت مقادیر بالاتر سه تغییر عمده در پاسخ فرکانسی نوری رخ داده است:



شکل ۵-۴: پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا به ازای مقادیر مختلف عرض چاه کوانتومی

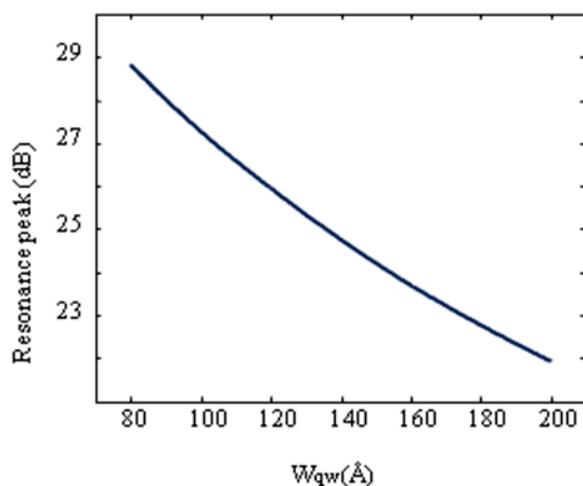
- مقدار پیک رزونانس کاهش یافته است.

- فرکانس وقوع پیک رزونانس افزایش یافته است.

- پهنای باند 3dB- نوری لیزر افزایش یافته است.

هر سه تغییر فوق، برای پاسخ فرکانسی نوری تغییرات مثبت به حساب می آیند و در حقیقت میتوان گفت با افزایش عرض چاه کوانتومی پاسخ فرکانسی نوری این لیزر بهبود می یابد. البته این عوامل از یکدیگر مستقل نبوده و به خصوص عامل سوم یعنی افزایش پهنای باند نوری به شدت تأثیر گرفته از کاهش پیک رزونانس و افزایش فرکانس رزونانس است.

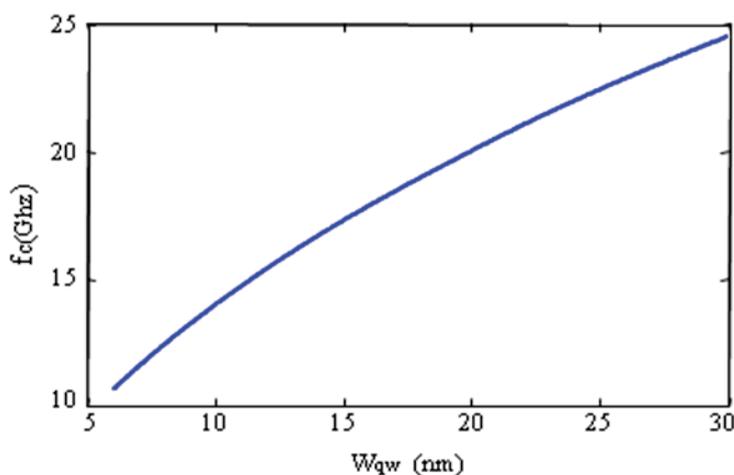
برای بررسی دقیقتر تأثیر عرض چاه کوانتومی بر پاسخ فرکانسی نوری منحنی اندازه پیک رزونانس پاسخ فرکانسی بر حسب عرض چاه در شکل ۵-۵ رسم شده است. همانطور که مشاهده میگردد با افزایش 120\AA در عرض چاه کوانتومی، اندازه پیک رزونانس حدود 7dB کاهش می یابد. لازم به ذکر است که مقدار 200\AA برای عرض چاه کوانتومی مقدار غیر منطقی نمی باشد. اندازه عرض چاه کوانتومی برای لیزرهای سابق از جنس GaAs در حدود 200\AA بود و لیزر ترانزیستوری اشاره شده در فصل چهارم نیز با عرض چاه کوانتومی 160\AA ساخته شده است.



شکل ۵-۵: اندازه پیک رزونانس پاسخ فرکانسی بر حسب عرض چاه کوانتومی

همچنین شکل ۵-۶ پهنای باند 3dB- لیزر ترانزیستوری طول موج بالا را بر حسب عرض چاه کوانتومی نمایش میدهد. در اینجا نیز مشاهده میشود که با رساندن عرض چاه به مقدار 300Å میتوان پهنای باند لیزر ترانزیستوری طول موج بالا را تا حدود 25GHz افزایش داد. بهبود پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری با افزایش عرض چاه کوانتومی به ۲ دلیل عمده صورت میگیرد. اول اینکه با افزایش عرض چاه فاکتور هندسی (V) افزایش یافته و پهنای باند نوری افزایش می یابد. (به رابطه ۳-۱۷ توجه کنید). و نکته دوم اینکه با افزایش عرض چاه مطابق با شکل (۵-۲) طول عمر بازترکیب خودبخودی در چاه کوانتومی (τ_{QW}) کاهش یافته و کاهش این پارامتر پهنای باند نوری لیزر را افزایش میدهد. (مجدداً به رابطه ۳-۱۷ توجه کنید).

نکته دیگری که در مورد اثر عرض چاه کوانتومی باید بیان شود، تأثیر این پارامتر بر بهره جریان لیزر ترانزیستوری است. افزایش عرض چاه کوانتومی به وضوح بهره جریان این قطعه را کاهش میدهد. از آنجا که با افزایش عرض چاه، احتمال به دام افتادن حاملها در آن بیشتر شده و احتمال عبور حاملها از چاه کمتر میشود، تعداد الکترونهايي که خود را به پیوند بیس-کلکتور رسانده و جریان کلکتور را تشکیل میدهند با افزایش عرض چاه کوانتومی کاهش می یابد. بدین ترتیب میتوان گفت که افزایش عرض چاه کوانتومی اگرچه پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری را بهبود می دهد، اما مشخصه ترانزیستوری این قطعه که بهره جریان است را کاهش میدهد.

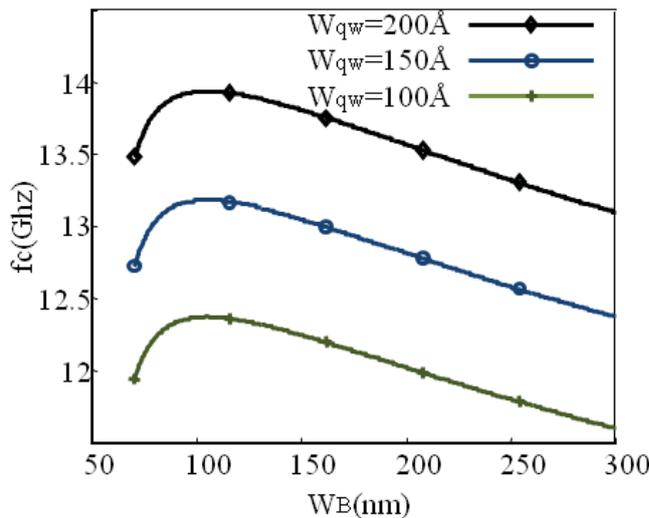


شکل ۵-۶: پهنای باند لیزر ترانزیستوری طول موج بالا بر حسب عرض چاه کوانتومی

. اصولاً بین بهره جریان و پاسخ فرکانسی (به خصوص پهنای باند نوری) در لیزرهای ترانزیستوری مصالحه وجود دارد. ما در مورد لیزرهای طول موج بالا، همانطور که در بخش ۳-۵ بیان شد، پاسخ فرکانسی با اشکالات عمده از جمله پیک رزونانس بالا مواجه است، به همین خاطر به نظر میرسد که در این مورد پاسخ فرکانسی نوری عامل مهمتری از بهره جریان بوده و بهتر است با افزایش عرض چاه کوانتومی پاسخ فرکانسی نوری را بهبود داد.

۵-۵: بررسی تأثیر عرض بیس بر پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا

تغییر عرض بیس تأثیر بسیار کمتری نسبت به عرض چاه کوانتومی بر پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری دارد. شکل ۷-۵ منحنی پهنای باند نوری لیزر ترانزیستوری بر حسب عرض بیس را برای سه مقدار متفاوت عرض چاه کوانتومی نمایش میدهد. همانطور که در این شکل مشخص است، برای لیزر ترانزیستوری طول موج بالا نیز همانند لیزر بیان شده در فصل چهارم نقطه بهینه ای برای عرض بیس به منظور رسیدن به حداکثر پهنای باند نوری وجود دارد. این مقدار که برای این لیزر ترانزیستوری در حدود 100nm میباشد، برای عرضهای مختلف چاه تفاوت چندانی نمیکند. البته همانطور که مشاهده میگردد 50Å تغییر در عرض چاه اثر به مراتب بیشتری از بهینه کردن عرض بیس دارد، ما همانطور که در بخش

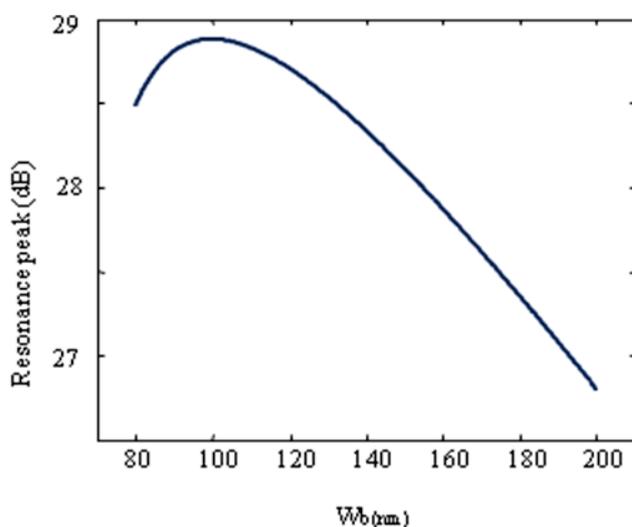


شکل ۷-۵: پهنای باند نوری لیزر ترانزیستوری طول موج بالا بر حسب عرض بیس به ازای عرض چاههای مختلف

گذشته بیان شد، افزایش عرض چاه کوانتومی در قبال بهبود پاسخ فرکانسی نوری بهره جریان را کاهش می‌دهد.

البته باید دید که افزایش پهنای باند نوری در نقطه بهینه عرض بیس به چه شکلی صورت می‌پذیرد. هنگامیکه عرض بیس لیزر ترانزیستوری تغییر میکند، پاسخ فرکانسی آن مشابه با شکل ۴-۲ تغییر میکند، یعنی با بهینه کردن عرض بیس لیزر ترانزیستوری پیک رزونانس آن افزایش یافته و فرکانس نقطه ای که در آن اندازه پاسخ فرکانسی به 3dB- میرسد نیز متعاقباً افزایش می‌یابد. این امر بدین معنی است که با بهینه کردن عرض بیس به منظور رسیدن به حداکثر پهنای باند نوری، مقدار پیک رزونانس افزایش می‌یابد.

شکل ۵-۸ مؤید این مطلب می‌باشد. در این شکل مشاهده میشود که در اطراف مقدار 100nm برای عرض بیس که بالاترین پهنای باند برای لیزر ترانزیستوری در این نقطه حاصل شد، بالاترین مقدار پیک رزونانس نیز وجود دارد. دو شکل ۵-۷ و ۵-۸ گویای این مطلب هستند که به طور آشکار مصالحه ای بین پهنای باند بالاتر و پیک رزونانس کمتر در بهینه کردن عرض بیس وجود دارد.



شکل ۵-۸: اندازه پیک رزونانس پاسخ فرکانسی لیزر ترانزیستوری طول موج بالا بر حسب عرض بیس

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱: جمع بندی و نتیجه گیری

به منظور تحلیل و شبیه‌سازی لیزرهای ترانزیستوری نیاز به ارائه مدلی مناسب برای این قطعه می‌باشد. در ابتدای این پروژه مدلی که بر مبنای آنالیز کنترل بار است معرفی گردید. با استفاده از این مدل میتوان به تحلیل و شبیه‌سازی لیزرهای ترانزیستوری پرداخته و مشخصات مختلف آنها از جمله پاسخ فرکانسی نوری آن، که در این پایان نامه بیشتر مد نظر است را بدست آورد.

پله بعدی در این پروژه بررسی تغییر عرض بیس لیزرهای ترانزیستوری با ساختار InGaP/GaAs بود. نتایج بررسی های انجام شده نشان میدهد که برای رسیدن به حداکثر پهنای باند، مقدار بهینه ای برای عرض بیس وجود دارد که این مقدار مستقل از بایاس و وابسته به پارامترهای ساختاری لیزر ترانزیستوری است. برای لیزر ترانزیستوری نمونه مطرح شده در این پروژه اندازه عرض بیس بهینه در حدود 1000\AA تعیین شد.

در ادامه پاسخ فرکانسی لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا به دست آورده شد. بدین منظور ابتدا پارامترهای مدل لیزر ترانزیستوری بر مبنای پارامترهای اساسی این لیزر ترانزیستوری مثل عرض لایه ها و آلایش لایه ها به دست آمد. سپس با استفاده از مدل مطرح شده، برای اولین بار پاسخ فرکانسی یک نمونه لیزر ترانزیستوری طول موج بالا به دست آمده و ارائه گردید. نتایج حاکی از این بود که پاسخ فرکانسی این لیزر ترانزیستوری دارای پیک رزونانس 29dB است که مقدار بالایی است و جزء نقاط ضعف این لیزر ترانزیستوری به حساب می آید. مطالعات نشان داد که بالا بودن پیک رزونانس مربوط به کم بودن بهره نوری ماده استفاده شده در این لیزر ترانزیستوری است که جنس آن به دلیل قرار گرفتن طول موج نور خروجی لیزر در مقدار $1.55\mu\text{m}$ انتخاب شده است. سپس بررسیها روی تأثیر عرض چاه کوانتومی این لیزر ترانزیستوری بر پاسخ فرکانسی آن صورت گرفت و با کمک تغییر عرض چاه مقدار پیک رزونانس حدود 7dB کاهش یافته و پهنای باند نیز افزایش یافت.

در انتها نیز تأثیر تغییر عرض بیس این لیزر ترانزیستوری بر پاسخ فرکانسی آن بررسی شد که مشاهدات، نتایجی مشابه با لیزر InGaP/GaAs به دست میداد. در اینجا نیز مقدار بهینه ای برای عرض

بیس وجود دارد که در آن مقدار پهنای باند لیزر ترانزیستوری ماکزیمم میشود. البته توجه بیشتر به ما نشان داد که برای این مقدار عرض بیس گرچه پهنای باند ماکزیمم میشود، اما مقدار پیک رزونانس پاسخ فرکانسی نیز ماکزیمم میگردد. به عبارت دیگر در بهینه کردن عرض بیس مصالحه ای بین حاکثر پهنای باند و حداقل پیک رزونانس وجود دارد.

۶-۲: پیشنهادات

در این بخش پیشنهاداتی در زمینه لیزر ترانزیستوری ارائه میگردد که میتواند در ادامه این پایان نامه ارائه شده، تبدیل به ایده هایی برای تعریف پروژه های کارشناسی ارشد و یا دکتری باشد. اولین مورد کار در زمینه کاواک لیزر ترانزیستوری است. تغییرات و بهینه سازی کاواک لیزرهای ترانزیستوری میتواند علاوه بر بهبود پاسخ فرکانسی نوری در سایر جنبه ها مثل تک مود کردن فرکانس نور خروجی لیزر ترانزیستوری مفید باشد. همانطور که در فصل دوم بیان شد، یک نمونه لیزر ترانزیستوری با ساختار DFB ساخته شده است که نور خروجی آن تک مود است. همچنین بازم با توجه به مقایسه لیزرهای ارائه شده در بند ۲-۱ و ۲-۲ فصل دوم مشاهده میگردد که با تغییر دادن طول کاواک بهبود زیادی در لیزر ترانزیستوری ایجاد شده است. بنابراین مطالعه ساختار کاواک لیزر ترانزیستوری میتوان زمینه مناسبی برای انجام تحقیقات باشد.

مورد دیگر مطالعه ساختارهای هترو است که میتواند لیزر ترانزیستوری در طول موج $\lambda=1.3\mu\text{m}$ ایجاد کند. همانطور که برای لیزرهای طول موج بالا بیان شد، عملکرد در طول موج $\lambda=1.55\mu\text{m}$ سبب کاهش تلفات در فیبرهای نوری میشود. همانطور که میدانیم فیبرهای نوری در طول موج $\lambda=1.3\mu\text{m}$ کمترین پراکندگی را دارند، بنابراین طراحی ساختاری برای لیزرهای ترانزیستوری که بتواند در این طول موج کار کند میتواند بسیار مفید باشد.

ایده دیگر در زمینه کاهش پیک رزونانس لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا است. همانطور که در فصل پنجم بیان شد بزرگترین مشکل پاسخ فرکانسی نوری لیزرهای ترانزیستوری طول موج بالا پیک رزونانس بالای آنها است. گرچه در فصل پنجم با تغییرات عرض چاه کوانتومی و عرض بیس سعی در

کاهش این پیک رزونانس شد و تا حدودی نیز این کاهش محقق گردید اما همانطور که بیان شد عامل اصلی وجود این پیک رزونانسی گین نوری پایین ماده است. بنابراین مطالعه در مورد روشهای افزایش این گین نوری میتواند پیک رزونانس این لیزرهای ترانزیستوری که بدون شک در آینده کاربردهای وسیعی خواهند داشت را کاهش دهد.

ایده دیگر در مورد ابعاد لیزرهای ترانزیستوری است. با مشاهده لیزرهای ترانزیستوری معرفی شده در فصل دوم متوجه میشویم که پهنای باند این لیزرهای ترانزیستوری در بهترین حالت ممکن در حدود 40GHz است. اما میدانیم که ترانزیستورهای HBT امروزی قادر به عملکرد در فرکانسهای تا حدود THz نیز میباشند. یکی از دلایل کم بودن پهنای باند لیزرهای ترانزیستوری نسبت به ترانزیستورهای HBT ابعاد بزرگتر آنها نسبت به HBT ها است. بنابراین مطالعات بر روی روشهای کاهش ابعاد لایه های ترانزیستوری با در نظر گرفتن امکان ساخت آنها میتواند جهش مهمی در افزایش پهنای باند لیزرهای ترانزیستوری ایجاد کند.

منابع و مراجع

- [1] کاتوزیان، حسن. فتونیک ، جلد دوم ، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، چاپ دوم ۱۳۸۸.
- [2] Milton Feng, Nick Holonyak Jr., The Transistor Laser, IEEE Spectrum, February 2006.
- [3] M. Feng, N. Holonyak, Jr., and W. Hafez, Light-emitting transistor: Light emission from InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors, APPLIED PHYSICS LETTERS 84, 151, 2004
- [4] Feng, M., Holonyak, N.: Room temperature continuous wave operation of a heterojunction bipolar transistor laser. Appl. Phys. Lett., vol. 87, pp. 131103-131103. (2005)
- [5] Feng, M., Holonyak, N., James, A., Cimino, K., Walter, G., Chan, R.: Carrier lifetime and modulation bandwidth of a quantum well AlGaAs/InGaP/GaAs/InGaAs transistor laser. Appl. Phys. Lett., 89, 113504-113507 (2006). doi: 10.1063/1.2346369
- [6] B. F. Chu-Kung, C. H. Wu, G. Walter, M. Feng, and N. Holonyak, Jr. , Modulation of high current gain ($\beta > 49$) light-emitting InGaN/GaN heterojunction bipolar transistors, APPLIED PHYSICS LETTERS 91, 232114 (2007)
- [7] H. W. Then, G. Walter, M. Feng, and N. Holonyak, Jr., Optical bandwidth enhancement of heterojunction bipolar transistor laser operation with an auxiliary base signal, APPLIED PHYSICS LETTERS 93, 163504 (2008)
- [8] F. Dixon, N. Holonyak, Jr., and M. Feng., Device Performance of Light Emitting Transistors with C-doped and Zn-doped Base Layers, IEEE. Quantum Electron., 387, (2009)
- [9] F. Dixon, M. Feng and N. Holonyak, Jr. , Distributed feedback transistor laser, APPLIED PHYSICS LETTERS 96, 241103 (2010)
- [10] H. W. Then, C. H. Wu, M. Feng, N. Holonyak, Jr. and G. Walter, Stochastic base doping and quantum-well enhancement of recombination in an n-p-n light-emitting transistor or transistor laser, APPLIED PHYSICS LETTERS 96, 263505 (2010)

[11] Dixon, F., Feng, M., Holonyak, N., Huang, Y., Zhang, Z. B., Ryou, J. H. and Dupuis, R. D. Transistor laser with emission wavelength at 1544 nm. Appl. Phys. Lett., vol. 93, no. 2, pp. 021111-1–021111-3, Jul. 2008.

[12] Zhang, L., Leburton, J. P.: Modeling of the transient characteristics of heterojunction bipolar transistor lasers. J.Appl. Phys. Vol.45, pp.359-366, doi: 10.1109/JQE.2009.2013215 (2009)

[13] Taghavi, I., Kaatuzian, H.: Gain-bandwidth trade-off in a transistor laser: quantum well dislocation effect. Opt Quant Electron, vol.41, pp.481-488, doi: 10.1007/s11082-010-9384-0 (2010)

[14] کاتوزیان، حسن. تئوری و فن آوری ساخت ادوات نیمه هادی ، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، ۱۳۸۸.

[15] W.Liu “Fundamentals of III-V devices”, John Wiley & sons, 1999.

[16] Kaatuzian, H.,Rahbardar, H.,Taghavi ,I.: Optical Modulation Bandwidth Enhancement of Heterojunction Bipolar Transistor Lasers Using Base Width Variation. NUSOD 2011 proceeding. (2011)

[17] Huang, Y., Ryou, J., Dupuis, R. D., Dixon, F., Holonyak, N. Feng, M. :InP/InAlGaAs light-emitting transistors and transistor lasers with a carbon-doped base layer. J. Appl. Phys. Vol.109, pp.063106-063112, doi: 10.1063/1.3561368 (2011)

[18] Huang, Y., Ryou, J.: Epitaxial Structure Design of a Long-Wavelength InAlGaAs/InP Transistor Laser. IEEE J. Quantum Electron. 47(5), 642-650, doi: 10.1109/JQE.2011.2108636 (2011 .a)

[19] Harrison , P.: Quantum wells, wires and dots. John Wiley & Sons Ltd. 2005.

[20] Smet, J.H., Fonstad, C.G., Hu, Q.:Intrawell and interwell intersubband transitions in multiple quantum wells for far-infrared sources. J. Appl. Phys.,vol.79, pp:9305-9320,doi: 10.1063/1.362607 (1996)

[21] BergerV.: Three-level laser based on intersubband transitions in asymmetric quantum wells: a theoretical stud, Semicond. Sci. Technol, vol.9,pp:1493

[22] Feng, M., Holonyak, N., Then, H. W., Walter, G.: Charge control analysis of transistor laser operation. 91, 053501-05303 (2007). doi: 10.1063/1.2767172

[23] Then, H. W., Feng, M., Holonyak, N., Wu, C. H.: Experimental determination of the effective minority carrier lifetime in the operation of a quantum-well n-p-n heterojunction bipolar light-emitting transistor of varying base quantum-well design and doping. Appl. Phys. Lett., 91, 033505-033508 (2007). doi: 10.1063/1.2759263

[24] کاتوزیان، حسن. فتونیک ، جلد اول ، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، چاپ دوم ۱۳۸۷.

[25] Asada, M.: Gain and intervalence band absorption in QW lasers. IEEE J. Quantum Electron. 20(7), 745-753 (1984)

[26] Coldren , L. A., Corzine, S. W.: Diode lasers and photonic integrated circuits. John Wiley & Sons, INC. 1995.

[27] Faraji, B., Wei Shi, Pulfrey, D.L., Chrostowski, L.: Analytical modeling of the transistor laser. IEEE J. Quantum Electron. 15, 594-603 (2009). doi: 10.1109/JSTQE.2009.2013178

[28] کاتوزیان، حسن. تئوری پالس ، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، ۱۳۷۲.

ضمیمه ۱: مدل کنترل بار برای لیزر ترانزیستوری

در این ضمیمه توزیع چگالی حاملهای اقلیت در چاه کوانتومی بیس لیزر ترانزیستوری با استفاده از معادلات پیوستگی و مدل کنترل بار محاسبه میگردد. [22],[28] مجدداً ساختار لیزر ترانزیستوری مشابه شکل ۱-۲ مییاشد. بیس این لیزر ترانزیستوری نیز از قسمتهای زیر تشکیل شده است:

$$(a) \text{ GaAs به ضخامت } 510 \text{ \AA} \text{ و آرایش } p=10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$(b) \text{ چاه کوانتومی از InGaAs به ضخامت } 160 \text{ \AA} \text{ بدون آرایش}$$

$$(c) \text{ GaAs به ضخامت } 210 \text{ \AA} \text{ و آرایش } p=10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

معادله پیوستگی برای هر سه ناحیه بیس برای حاملهای اقلیت الکترون تزریق شده به شکل زیر نوشته میشود:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n}{\tau_{bulk}} \quad \text{for regions (a) and (c)} \quad (a1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n}{\tau_{qw}} \quad \text{for region (b)} \quad (a2)$$

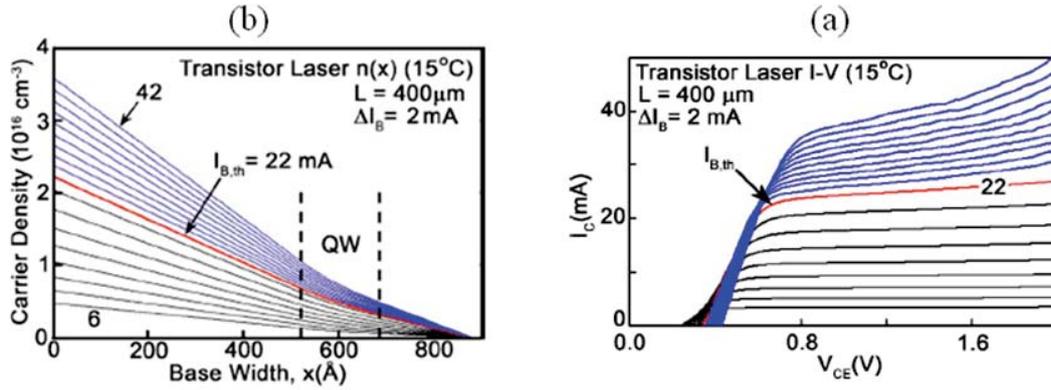
در معادلات (a1) و (a2)، $n=n(x,t)$ توزیع الکترون در بیس است. τ_{qw} و τ_{bulk} زمان بازترکیب در GaAs و چاه کوانتومی InGaAs است. میدانیم که ترم n/τ_{qw} شامل تولید فتون به صورت خود به خودی و القایی است و این ترم به ترانزیستور مشخصه نوری اضافه میکند.

از معادلات (a1) و (a2) با فرض $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$ و شرط مرزی چگالی بار صفر در اتصال بیس-کلکتور، توزیع بار برای جریان بیس افزاینده مطابق با شکل الف-a، به صورت شکل الف-b می باشد. جریانهای کلکتور و امیتر از روابط زیر به دست می آیند:

$$I_C = qAD \left(\frac{\delta n}{\delta x} \right)_{BC}$$

$$I_E = qAD \left(\frac{\delta n}{\delta x} \right)_{EB}$$

$$I_C + I_B + I_E = 0$$



شکل الف: منحنی I-V لیزر ترانزیستوری و چگالی حاملهای اقلیت در ناحیه بیس

پروفایل چگالی حاملهای بیس در لیزر ترانزیستوری از حالت معمول آن در HBT کمی منحرف شده است و دیگر قابل تقریب به شکل مثلث نمی باشد. افزایش شیب آن پس از چاه کوانتمی به دلیل بازترکیب سریعتر حاملها در چاه کوانتمی است. در آستانه تابش لیزری τ_{qw} ناگهان کاهش می یابد و بازترکیب القایی سرعت گرفته و بخش اعظم بازترکیب در ناحیه چاه کوانتمی را تشکیل میدهد. بنابراین، انحنا منحنی چگالی حاملها در محدوده چاه کوانتمی برای منحنی های بالاتر از آستانه شدیدتر است، که این مسئله به وضوح در شکل الف-a مشاهده میشود.

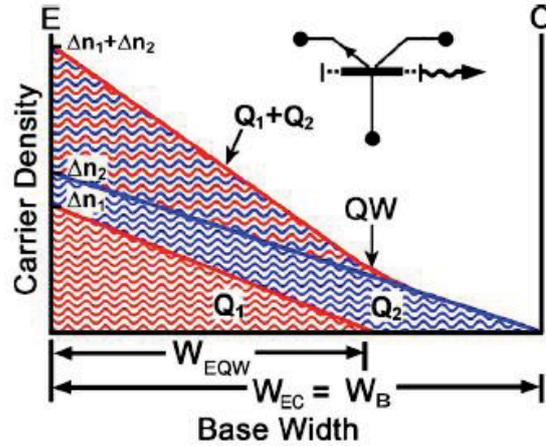
در شکل "ب" مدل کنترل بار برای ناحیه بیس برای کلکتور الکتریکی (اتصال بیس کلکتور) و کلکتور نوری (چاه کوانتمی) ترسیم شده است. با فرض اینکه بازترکیب در ناحیه GaAs نسبت به چاه کوانتمی InGaAs بسیار جزئی باشد میتوانیم توزیع بار بیس را با حاصل جمع دو مثلث بار به نامهای Q1 و Q2 تقریب بزنیم. Q1 و Q2 به شکل دو مثلث که از توزیع چگالی حاملهای اقلیت گرفته میشوند می باشند. همانطور که در شکل "ب" مشخص است:

$$Q_1 = q\Delta n_1 A W_{EQW} / 2$$

$$Q_2 = q\Delta n_2 A W_{EC} / 2$$

و بار کل بیس:

$$Q = Q_1 + Q_2$$



شکل ب: آنالیز بار برای توزیع حاملهای بیس

Q1 مشخص کننده حاملهای نفوذ کننده به چاه کوانتومی برای بازترکیب است و Q2 معرف حاملهای باقی مانده که به اتصال B-C میرسند میباشد. در مدل کنترل بار:

$$I_C = Q_2 / \tau_{t2}$$

$$I_B = \frac{(Q_1 + Q_2)}{\tau_{bulk}} + \frac{Q_1}{\tau_{t1}}$$

که در آن τ_{t1} زمان گذر از امیتر به چاه کوانتومی و τ_{t1} زمان گذر در طول کل بیس است.

$$\tau_{t1} = \frac{W_{EQW}^2}{2D} = 0.67 \text{ ps}$$

$$\tau_{t2} = \frac{W_{EC}^2}{2D} = 1.5 \text{ ps}$$

کل زمان بازترکیب بیس، τ_B ، برای حاملهای بیس می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\frac{1}{\tau_B} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{Q_1}{[(Q_1 + Q_2)\tau_{t1}]}$$

Abstract:

The invention of Transistor Lasers (TL) in year 2004, made it possible, the creation of an electronic device which works as transistor and laser with two optical and electrical outputs simultaneously. Since this device has important effects on the future of photonic devices, today various researches accomplish on these devices in order to improve their performances.

The goal of this project is Analysis, simulation and performance improvement of Transistor lasers. In order to achieve this goal, after an introduction of these devices and a historical review, we introduce an analytical model based on charge control model for transistor lasers. For the first step, a conventional InGaP/GaAs transistor laser will be analyzed and the effect of base width on the optical modulation response and current gain of this device will be achieved with use of simulation.

For a 1.55 μ m fabricated transistor laser with a single quantum well, which is a modern type of transistor lasers, the optical bandwidth will be estimated for the first time. Using these analyses, it will be found that frequency response of this optoelectronic device has some problems which are not very desirable. Finally the effect of change in some parameters of this device on its optical frequency will be achieved and with optimization of these parameters the optical frequency response of this device will be improved.