

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم

گروه فیزیک

(گرایش فوتونیک)

تحلیل، شبیه سازی و بهینه سازی لیزرهای آبشاری کوانتومی THz دو طول موجی با طول
موج نوسان پایدار

از:

سجاد یداله زاده

اساتید راهنما :

دکتر اسفندیار رجایی

دکتر علی رستمی

مرداد ۹۰

تقدیم بہ لجنہ سبز پروما اور عزیزم...

به نام خدا

حال که با استعانت از ایزد یکتا توفیق تدوین این پایان نامه را یافته ام بر خود واجب می دانم از تمامی عزیزانی که در طی انجام این پژوهش از راهنمایی شان بهره مند گشته ام تشکر و قدردانی نمایم.

در ابتدا صمیمانه ترین تقدیرها و آرزوها تقدیم به خانواده عزیزم که همواره مشوق و حامی من بوده اند.

از اساتید راهنمای گرانقدرم آقای دکتر رجایی و آقای دکتر رستمی که با صبوری مرا راهنمایی نموده و در پیشبرد این پایان نامه از هیچ تلاشی دریغ ننموده اند کمال تشکر را دارم.

از آقای دکتر فرجامی شایسته و آقای دکتر باطبی که با سعه صدر زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند و همچنین از نماینده تحصیلات تکمیلی آقای دکتر صفاری صمیمانه تشکر می کنم.

در نهایت از تمامی کسانی که در طول این دوره از مصاحبت و همفکری شان استفاده نمودم بویژه آقای دکتر رسولی و آقای دکتر باغبان و دوست عزیزم آقای عبدالله پناهنده صمیمانه سپاسگزاری می کنم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ذ	فهرست جدول ها
ر	فهرست شکل ها
ش	چکیده فارسی
ص	چکیده انگلیسی
۱	مقدمه

فصل ۱ بررسی پیشینه لیزرهای آبشاری کوانتومی

۴	۱-۱- تاریخچه
۵	۲-۱- کاربردهای محدوده فرکانسی تراهرتز
۸	۳-۱- منابع تراهرتز
۹	۱-۳-۱- تولید مستقیم
۹	۱-۱-۳-۱- دیود Gunn
۱۰	۲-۱-۳-۱- دیود IMPATT
۱۰	۳-۱-۳-۱- دیود تونلی
۱۱	۴-۱-۳-۱- ترانزیستور
۱۱	۵-۱-۳-۱- لیزر تراهرتز Si و Ge
۱۲	۶-۱-۳-۱- لیزر آبشاری کوانتومی

۱۲	۷-۱-۳-۱- لیزرهای گازی
۱۲	۲-۳-۱- تولید غیر مستقیم
۱۳	۱-۲-۳-۱- ترکیب نوری
۱۳	۲-۲-۳-۱- سوئیچ Auston
۱۴	۴-۱- مهندسی کوانتوم
۱۵	۵-۱- موجبرهای تراهرتز
۱۶	۱-۵-۱- موجبر پلاسمون
۱۸	۲-۵-۱- موجبر فلز - فلز
۲۰	۳-۵-۱- موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق
۲۲	۶-۱- مقایسه موجبرها
۲۳	۷-۱- رشد قطعه QCL
۲۴	۸-۱- مراحل ساخت
	فصل ۲
	فیزیک لیزرهای آبخاری کوانتومی
۲۷	۱-۲- مقدمه
۲۷	۲-۲- گذارهای تابشی و بر همکنش نور - ماده
۳۴	۱-۲-۲- نمایش بهره نوری
۳۶	۳-۲- دینامیک پراکندگی حامل در لیزرهای آبخاری کوانتومی
۳۸	۱-۳-۲- پراکندگی الکترون - LO-Phonon
۳۹	۲-۳-۲- پراکندگی الکترون - الکترون
۴۲	۴-۲- بررسی معادله شرودینگر

۴۲ ۱-۴-۲- حل معادله شرودینگر

۴۲ ۱-۱-۴-۲- چاه مربعی بی نهایت

۴۴ ۲-۱-۴-۲- چاه مربعی محدود متقارن و نامتقارن

۴۶ ۲-۴-۲- روش محاسبات

۴۶ ۱-۲-۴-۲- روش عددی تفاضلات محدود

۴۸ ۲-۲-۴-۲- حل عددی معادله شرودینگر به روش تفاضلات محدود

۴۹ ۳-۴-۲- مدل حل معادلات شرودینگر و پواسون

فصل ۳ لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز

۵۲ ۱-۳- لیزرهای آبخاری کوانتومی و مفاهیم اساسی آنها

۵۲ ۱-۱-۳- ماهیت تک قطبی و گذارهای بین زیرباندی

۵۴ ۲-۱-۳- شکل آبخاری

۵۵ ۳-۱-۳- سیستم های مواد متداول

۵۶ ۲-۳- مسیر پیشرفت لیزرهای آبخاری کوانتومی

۵۶ ۱-۲-۳- عملکرد در ناحیه فرکانسی فروسرخ میانی

۶۲ ۲-۲-۳- لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز

۶۴ ۱-۴- ناحیه فعال

۶۵ ۳-۴- ناحیه تزریق QCL

۶۶ ۴-۴- معادلات آهنگ یک QCL سه ترازه تک طول موجی

۶۷ ۴-۴- لیزرهای آبخاری کوانتومی دو طول موجی و چند طول موجی

۶۷ ۱-۴-۴- آشکارسازی گاز از طریق طیف بینی جذبی با استفاده از QCL

۶۹ ۴-۱-۱-۱- نظریه طیف بینی جذبی

۷۰ ۴-۱-۲- ساختار QCL دو طول موجی

۷۰ ۴-۱-۳- معادلات آهنگ

فصل ۴ شبیه سازی مشخصه های لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز تک و دو طول موجی

۷۵ ۴-۱- شبیه سازی مشخصه های QCL تک طول موجی

۷۵ ۴-۱-۱- چگالی و وارونگی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان

۷۶ ۴-۱-۲- چگالی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان با بهره آستانه متفاوت

۷۷ ۴-۱-۳- توان خروجی بر حسب جریان تزریقی با بهره آستانه مختلف

۷۷ ۴-۱-۴- چگالی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان با زمان های واهلش متفاوت

۷۸ ۴-۱-۵- توان خروجی بر حسب جریان تزریقی با زمان های واهلش متفاوت

۷۹ ۴-۱-۶- طیف بهره لیزردهی تک طول موجی

۷۹ ۴-۱-۷- پاسخ فرکانسی لیزر آبخاری کوانتومی تک طول موجی

۸۰ ۴-۲- شبیه سازی مشخصه های QCL های دو طول موجی

۸۰ ۴-۲-۱- چگالی و وارونگی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان

۸۲ ۴-۲-۲- توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای هر دو طول موج خروجی

۸۳ ۴-۲-۳- پاسخ فرکانسی لیزر آبخاری کوانتومی دو طول موجی

۸۳ ۴-۲-۴- طیف های بهره لیزردهی دو طول موجی

۸۴ ۴-۳- شبیه سازی ناحیه فعال لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز

۸۴ ۴-۳-۱- ساختار نوار هدایت، ترازهای انرژی و توابع موج برای تک چاه کوانتومی با اثر برهمکنش حامل ها

۸۷ ۴-۳-۲- اثر آلانیدگی بر ساختار نوار هدایت و ترازهای انرژی برای چند چاه کوانتومی

- ۸۸ ۳-۳-۴- ناحیه فعال لیزر آبخاری کوانتومی با ساختار ابرشبکه چیرپ شده
- ۹۰ ۴-۳-۴- ناحیه فعال لیزر آبخاری کوانتومی با ساختار تخلیه با فونون مشدد
- ۹۱ ۵-۳-۴- ناحیه فعال لیزر آبخاری کوانتومی با ساختار مقید به پیوستار
- ۹۳ ۶-۳-۴- ساختار نوار هدایت و مربع توابع موج الکترون های لیزر آبخاری کوانتومی دو طول موجی

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهاد برای ادامه کار

۹۷ ۵-۱- نتیجه گیری

۹۷ ۵-۲- پیشنهاد برای ادامه کار

۹۸ مراجع

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۷۳	جدول (۱): پارامترهای نمونه و ثابت مورد استفاده

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۵	شکل (۱-۱): خط سیر زمانی توسعه لیزرهای آبشاری کوانتومی
۶	شکل (۲-۱): نمایش محدوده تراهرتز در طیف الکترومغناطیس
۹	شکل (۳-۱): عملکرد چند موج پیوسته در محدوده ی تراهرتز
۱۳	شکل (۴-۱): روش ترکیب نوری برای تولید امواج تراهرتز
۱۴	شکل (۵-۱): سوئیچ Auston
۱۴	شکل (۶-۱): روند توسعه علوم در دو قرن اخیر
۱۶	شکل (۷-۱): طرح سه موجبر تراهرتز
۱۷	شکل (۸-۱): اتلاف و محدودیت موجبر پلاسمون
۱۹	شکل (۹-۱): اتلاف و محدودیت موجبر فلز - فلز
۱۹	شکل (۱۰-۱): اتلاف و محدودیت موجبر فلز- فلز برای نواحی فعال ضخامت مختلف
۲۱	شکل (۱۱-۱): اتلاف و محدودیت موجبر موجبر پلاسمون سطحی نیمه عایق
۲۸	شکل (۱-۲): نوار هدایت سیستم سه ترازه لیزر آبشاری کوانتومی تراهرتز
۳۷	شکل (۲-۲): فرایندهای مهم پراکندگی برای دو حالت $E_{fi} > E_{LO}$ و $E_{fi} < E_{LO}$
۳۸	شکل (۳-۲): پراکندگی های مهم درون زیرباندی و درون دو زیرباندی
۴۰	شکل (۴-۲): مکانیزم های پراکندگی الکترون- الکترون
۴۱	شکل (۵-۲): روابط برداری ممتوم ها
۴۵	شکل (۶-۲): چاه مربعی نامتقارن با عرض L و ارتفاعهای متفاوت
۵۰	شکل (۷-۲): فلوجارت حل همزمان معادلات شرودینگر و پواسون

- شکل (۱-۳): گذار بین بانندی و گذار بین زیربانندی ۵۳
- شکل (۲-۳): نمایش دو پریود از دیاگرام بانندی نوار هدایت و شکل آبشاری لیزرهای آبشاری کوانتومی ۵۵
- شکل (۳-۳): نمایش مفهوم تقویت نوری یک ابرشبکه نیمه هادی مبتنی بر ایده Suris و Kasarinov ۵۷
- شکل (۴-۳): اولین ساختار مبتنی بر تونل زنی مشدد ترتیبی ۵۹
- شکل (۵-۳): دامنه تبادل اندازه حرکت طی فرایند پراکندگی الکترون- LO-Phonon ۶۰
- شکل (۶-۳): شکل نوار هدایت و مربع توابع موج لیزر ۶۱
- شکل (۷-۳): تعدادی از فرایندهای بین زیربانندی امکان پذیر در QCL های تراهرتز ۶۳
- شکل (۸-۳): گذارهای عمودی و قطری برای QCLs ۶۴
- شکل (۹-۳): مدل ساده QCL سه ترازه ۶۶
- شکل (۱۰-۳): طیف های جذب CH_4 (a) و H_2S (b) ۶۸
- شکل (۱۱-۳): مدل ساده برای QCL دو طول موجی ۷۱
- شکل (۱-۴): چگالی و وارونگی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان ۷۶
- شکل (۲-۴): چگالی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان با بهره آستانه متفاوت ۷۶
- شکل (۳-۴): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی با بهره آستانه مختلف ۷۷
- شکل (۴-۴): چگالی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان با زمان های واهلش متفاوت ۷۸
- شکل (۵-۴): توان خروجی بر حسب جریان تزریقی با زمان های واهلش متفاوت ۷۸
- شکل (۶-۴): طیف بهره لیزردهی تک طول موجی ۷۹
- شکل (۷-۴): پاسخ فرکانسی بهنجار شده برای لیزردهی تک طول موجی ۸۰
- شکل (۸-۴): چگالی جمعیت ترازهای تابشی بر حسب چگالی جریان ۸۱
- شکل (۹-۴): وارونگی جمعیت بر حسب چگالی جریان ۸۱

- ۸۲ منحنی های توان خروجی بر حسب جریان تزریقی برای هر دو طول موج خروجی : شکل (۱۰-۴)
- ۸۳ پاسخ فرکانسی بهنجار شده برای لیزردهی دو طول موجی : شکل (۱۱-۴)
- ۸۳ طیف های بهره برای گذارهای $3 \rightarrow 4$ و $1 \rightarrow 2$: شکل (۱۲-۴)
- ۸۵ ساختار نوار هدایت ، ترازهای انرژی و توابع موج برای چاه 80 \AA و سدهای 100 \AA : شکل (۱۳-۴)
- ۸۵ ساختار نوار هدایت ، ترازهای انرژی و توابع موج برای چاه 80 \AA و سدهای 100 \AA : شکل (۱۴-۴)
- ۸۶ ساختار نوار هدایت ، ترازهای انرژی و توابع موج برای چاه 80 \AA و سدهای 100 \AA : شکل (۱۵-۴)
- ۸۶ ساختار نوار هدایت ، ترازهای انرژی و توابع موج برای چاه 80 \AA و سدهای 100 \AA : شکل (۱۶-۴)
- ۸۷ ساختار نوار هدایت ، ترازهای انرژی برای چند چاه کوانتومی 40 \AA و سدهای 100 \AA : شکل (۱۷-۴)
- ۸۸ ساختار نوار هدایت ، ترازهای انرژی برای چند چاه کوانتومی 40 \AA و سدهای 100 \AA : شکل (۱۸-۴)
- ۸۹ شکل ساده برای درک مفهوم ساختار ابرشبکه چیرپ شده : شکل (۱۹-۴)
- ۹۰ شکل دقیق نوار هدایت ساختار ابرشبکه چیرپ شده : شکل (۲۰-۴)
- ۹۱ شکل ساده برای درک مفهوم ساختار تخلیه با فونون مشدد : شکل (۲۱-۴)
- ۹۱ شکل دقیق نوار هدایت ساختار تخلیه با فونون مشدد : شکل (۲۲-۴)
- ۹۲ شکل ساده برای درک مفهوم ساختار مقید به پیوستار : شکل (۲۳-۴)
- ۹۳ شکل دقیق نوار هدایت ساختار مقید به پیوستار : شکل (۲۴-۴)
- ۹۴ ساختار باندها هدایت و مربع توابع موج الکترون ها برای یک پرپود : شکل (۲۵-۴)
- ۹۴ ساختار باندها هدایت و مربع توابع موج الکترون ها : شکل (۲۶-۴)

چکیده

تحلیل ، شبیه سازی و بهینه سازی لیزرهای آبخاری کوانتومی THz دو طول موجی با طول موج نوسان پایدار

سجاد یداله زاده

طراحی لیزرهایی با طول موج نوسان در بازه تراهرتز یکی از درخواست های صنعت و از ضروریات توسعه در عرصه فناوری تراهرتز می باشد. در این پایان نامه ابتدا به لیزرهای نیمه رسانای آبخاری کوانتومی می پردازیم اهمیت لیزرهای چند طول موجی را متذکر شده و به طراحی آنها می پردازیم. همچنین مکانیزم لیزرهای دو طول موجی و روابط مربوط به بهره و معادلات آهنگ و فاکتورهای پراکندگی مختلف در ساختارهای کوانتومی آبخاری از نظر کوانتومی مطالعه و شبیه سازی کرده ایم. فوتونها بوسیله گذارهای درون زیر نواری الکترونی که کاملاً درون نوار هدایت جایگزیده شده اند ، گسیل می شوند. و طول موج بوسیله مهندسی پهناهای چاه و سد در ساختارهای نامتجانس چاه کوانتومی چندتایی انتخاب می شوند. ساخت لیزرهایی با چنین طول موج بلندی به طور سنتی چالش برانگیز است چون دستیابی به وارونگی جمعیت بین ترازهای انرژی نزدیک به هم مشکل است. این پایان نامه توسعه لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتزی را گزارش می کند که در آنها حالت تابشی پایین تر با پراکندگی فونون نوری طولی مشدد تخلیه می شود. این مکانیزم موثر و حساس به دما است و از برگشت حرارتی به علت جدائی انرژی بزرگ بین تراز تابشی پایین تر و تزریق کننده جلوگیری می کند. هر دو ویژگی برای عملکرد در دماهای بالاتر در طول موج های بلندتر مهم هستند. به همین سبب می خواهیم لیزر دو طول موجی و پایدار نسبت به شرایط محیطی طراحی ، شبیه سازی و بهینه سازی نمائیم. برای این کار از ساختار های کوانتومی آبخاری و با بهینه سازی ابعاد و ماده GaN استفاده خواهد شد.

کلید واژه : تراهرتز ، لیزر کوانتومی آبخاری ، معادلات آهنگ ، دو طول موجی

Abstract

Analysis, Simulation and Optimization of Dual-Wavelength THz Quantum Cascade Laser with stable oscillation wavelength

Sajjad Yadollahzadeh

Design of lasers with oscillating wavelength in the terahertz range is one of the industrial requests and most important developing components in THz technology. In this thesis at the first, we study semiconductor lasers operation based on quantum cascade. Then importance of the multi-wavelength design is considered. also the mechanism of dual-wavelength generation, related equations of the gain, rate equations and different scattering mechanism in the quantum cascade laser structure with quantum aspect is studied and simulated. Photons are emitted via electronic intersubband transitions that take place entirely within the conduction band, where the wavelength is chosen by engineering the well and barrier widths in multiple-quantum-well heterostructures. Fabrication of such long wavelength lasers has traditionally been challenging, since it is difficult to obtain a population inversion between such closely spaced energy levels. This thesis reports the development of terahertz QCLs in which the lower radiative state is depopulated via resonant longitudinal-optical phonon scattering. This mechanism is efficient and temperature insensitive, and provides protection from thermal backfilling due to the large energy separation between the lower radiative state and the injector. Both properties are important in allowing higher temperature operation at longer wavelengths. Therefore, we designed, simulated and optimized dual-wavelength quantum cascade laser and stable toward environment conditions. For this work we have used the quantum cascade structures, dimension optimization and GaN.

Keyword: Terahertz, Quantum Cascade Laser, Rate Equations, Dual -Wavelength.

مقدمه

فناوری تراهرتز با کاربردهای بسیار زیاد در زمینه های طیف نمائی ، عکس برداری زیرمیلیمتری ، مسائل امنیتی ، آشکارسازی گازها و آلودگی ها ، مسافت سنجی ، مخابرات نوری بدون سیم در فضای آزاد ، پردازش فوق سریع سیگنال و دهها کاربرد دیگر بسیار مورد علاقه قرار گرفته است .

در فصل اول به بررسی سازکارهای مرتبط با لیزرهای نیمه هادی براساس گذارهای نوری بین زیرباندی پرداخته و ویژگیهای انواع طرح های مختلف ارائه شده برای لیزرهای آبخاری کوانتومی از سال ۱۹۹۴ را مورد مطالعه قرار دادیم. در فصل دوم روش حل تحلیلی معادله شرودینگر که پایه و اساس تحلیل رفتار حاملها در ساختارهای کوانتومی است برای چاه پتانسیل متقارن و نیز نامتقارن ارائه شده است. بدلیل محدودیت استفاده از روشهای حل تحلیلی در اکثر ساختارهای عملی ، یکی از روشهای حل عددی معادلات دیفرانسیل غیرخطی ، بنام روش تفاضلهای محدود مورد مطالعه قرار دادیم و روش گسسته سازی و حل معادله شرودینگر با استفاده از روش تفاضلهای محدود ارائه شده است. بدلیل اینکه در اکثر ساختارهای کوانتومی از آلائیدهای حاملها برای ارتقاء ویژگیهای ساختار بهره می بردند از این رو بایستی معادله کنترل بار نیز در این موارد حل شود بنابراین روش حل همزمان معادلات شرودینگر و پواسون مورد بررسی قرار گرفته است و نمونه هایی در این مورد ارائه شده است.

در فصل سوم لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز را معرفی خواهیم کرد. گذارهای بین زیرباندی بدلیل ویژگیهای جالب توجهی که از خود نشان می دهند در سالهای اخیر بسیار مورد توجه واقع شده اند و در ساختار ادوات الکترونوری بسیاری مانند مدلاتورهای نوری ، لیزرهای مبتنی بر چاههای کوانتومی و آشکارسازی مادون قرمز استفاده شده است و می توان ادعا نمود که لیزرهای آبخاری کوانتومی اوج کار مهندسی کوانتوم و مهندسی زیرباندیها است.

و در فصل چهارم مشخصه های لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز تک طول موجی و دو طول موجی را ارائه خواهیم کرد. برای داشتن یک لیزر آبخاری کوانتومی تراهرتز با قابلیت عملکرد در دماهای بالا ماده ای با انرژی فونون های نوری طولی بالا مورد نیاز است. یک ماده ای مناسب که اخیراً مورد توسعه و توجه قرار گرفته است GaN/AlGaN است که فونون هایی با انرژی ۹۱/۹ میلی الکترون ولت دارد و ما نیز در این پایان نامه از آن بهره جسته ایم.

فصل اول

بررسی پیشینه لیزرهای آبخاری کوانتومی

۱-۱- تاریخچه

از نقطه نظر تاریخی ابر شبکه^۱ و چگونگی انتقال الکترون در آن برای اولین بار توسط ایساک^۲ و تسو^۳ در سال ۱۹۷۰ مورد بررسی قرار گرفت [۱]. استفاده از گذارهای بین زیرباندی برای تولید امواج الکترومغناطیسی ابتدا در سال ۱۹۷۱ توسط کازاریو^۴ و سوریس^۵ در قالب یک ساختار ابر شبکه پیشنهاد شد [۲]. این تابش بین زیر باندی در سال ۱۹۸۵ توسط وست^۶ مشاهده شد [۳]. اولین تونل زنی مشدد متوالی^۷ از میان یک ابر شبکه چاه کوانتومی چند تایی نیز در سال ۱۹۸۶ توسط کاپاسو و همکارانش گزارش شد [۴]. این ابر شبکه در عمل به عنوان یک لیزر آبخاری کوانتومی (QCL)^۸ قابل استفاده نبود و از لحاظ الکتریکی ناپایدار بود. فیست^۹ و همکاران در سال ۱۹۹۴ اولین لیزر مبتنی بر گذارهای بین زیر باندی را برای تابش در طول موج ۴/۳ میکرومتر طراحی شده بود نمایش دادند و آن را لیزر آبخاری کوانتومی نامیدند [۵].

بعد از آن، پیشرفتها به سرعت ادامه یافت که به صورت شماتیک در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. یک سال بعد از این اکتشاف لیزرها در موج پیوسته در دماهای خیلی کم [۶]، و در مد پالسی در دمای اتاق [۷]، کار می کردند. لیزرهای پسخورد توزیع شده^{۱۰} برای بار اول در سال ۱۹۹۶ معرفی شدند [۸]، که لیزرهای با خروجی تک مد^{۱۱} قابل تنظیم به صورت پیوسته را در اختیار قرار می دادند.

اولین لیزر آبخاری کوانتومی که در سیستم AlGaAs / GaAs روی GaAs ساخته شده بود در سال ۱۹۹۸ توسط سیرتوری^{۱۲} نشان داده شد [۹]. اولین QCLs در محدوده فرو سرخ دور با طول موج های بالای ۲۰ میکرومتر در سال ۲۰۰۰ نمایش داده شدند [۱۰]. در سال ۲۰۰۲ عملکرد موج پیوسته یک QCL در محدوده فرو سرخ میانی در دمای حدود ۳۱۲ کلوین گزارش شد. اولین مرحله امیدوار کننده برای ساخت QCL در ناحیه ی فرکانسی زیر تراهرتز در سال ۱۹۹۸ توسط روچت^{۱۳} به وسیله مشاهده تابش الکتریکی در فرکانس ۴/۵ تراهرتز از یک ساختار QC^{۱۴} گزارش شد [۱۱]. جرقه ای برای ساخت لیزرهای مشابه

1 Super Lattice

2 Esaki

3 Tsu

4 Kazariav

5 Suris

6 West

7 Sequential Resonant Tunneling

8 Quantum cascade laser

9 Mid-Infrared

10 Distributed Feedback Laser

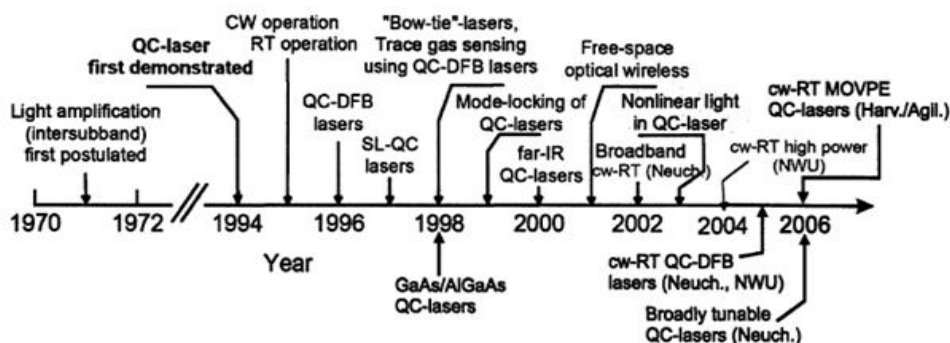
11 Single Mode

12 Sirtori

13 Rochat

14 Quantum cascade

گردید. لیزردهی^۱ در سال ۲۰۰۲ در فرکانس ۴/۴ تراهرتز در ساختار ابرشبکه چیرپ شده^۲ عملی شد [۱۲]، و مدت کمی پس از آن در ماه ژوئن سال ۲۰۰۲ ساختاری مشابه در فرکانس ۴/۵ تراهرتز توسط گروه فیست گزارش شد [۱۳].



شکل (۱-۱): خط سیر زمانی توسعه لیزرهای آبخاری کوانتومی [۱۱].

در طی کمتر از چهار سال پیشرفتهای زیادی در زمینه لیزرهای آبخاری کوانتومی تراهرتز حاصل شد. طراحی QCL در ساختار مقید به پیوستار و همچنین ساخت یکی از بهترین QCL های تراهرتز از لحاظ دمایی براساس تخلیه با فونون مشدد^۳ [۱۴] که می توانست تا دمای ۱۶۴ کلوین در مد پالسی و تا دمای ۱۱۷ کلوین در مد موج پیوسته [۱۵] عمل کند از مهمترین پیشرفت ها به حساب می آیند هم اکنون تابش ها در محدوده فرکانسی ۴/۵ تراهرتز (۶۶ میکرومتر) [۲]، تا ۱/۶ تراهرتز (۱۹۰ میکرومتر) گسترش پیدا کرده اند [۱۶].

۱-۲- کاربردهای محدوده فرکانسی تراهرتز

محدوده فرکانسی تراهرتز یعنی باند فرکانسی ۳۰۰ گیگاهرتز تا ۱۰ تراهرتز یا بازه طول موجی ۱۰۰۰ تا ۳۰ میکرومتر ناحیه ای از طیف الکترومغناطیسی است که بین نواحی مربوط به الکترونیک (رادویوی و میکروویو) و فوتونیک (مرئی و فروسرخ) قرار می گیرد که به سبب کمبود منابع تابش مناسب و مؤثر نسبت به همسایگانش کمتر مورد بررسی و توسعه بوده است. اما به هر حال میزان علاقه به محدوده ی تراهرتز که با نام های فرو سرخ دورو زیرمیلیمتر نیز شناخته می شود به طور قابل ملاحظه ای در دهه اخیر رو به افزایش بوده که پیشرفت های سریع و تنوع قطعات ساخته شده و کاربردهای آنها مؤید این مطلب می باشد. اولین و قدیمی ترین کاربرد امواج تراهرتز استفاده از آنها در زمینه طیف نمایی است [۱۷]. که اساساً از این حقیقت ناشی می

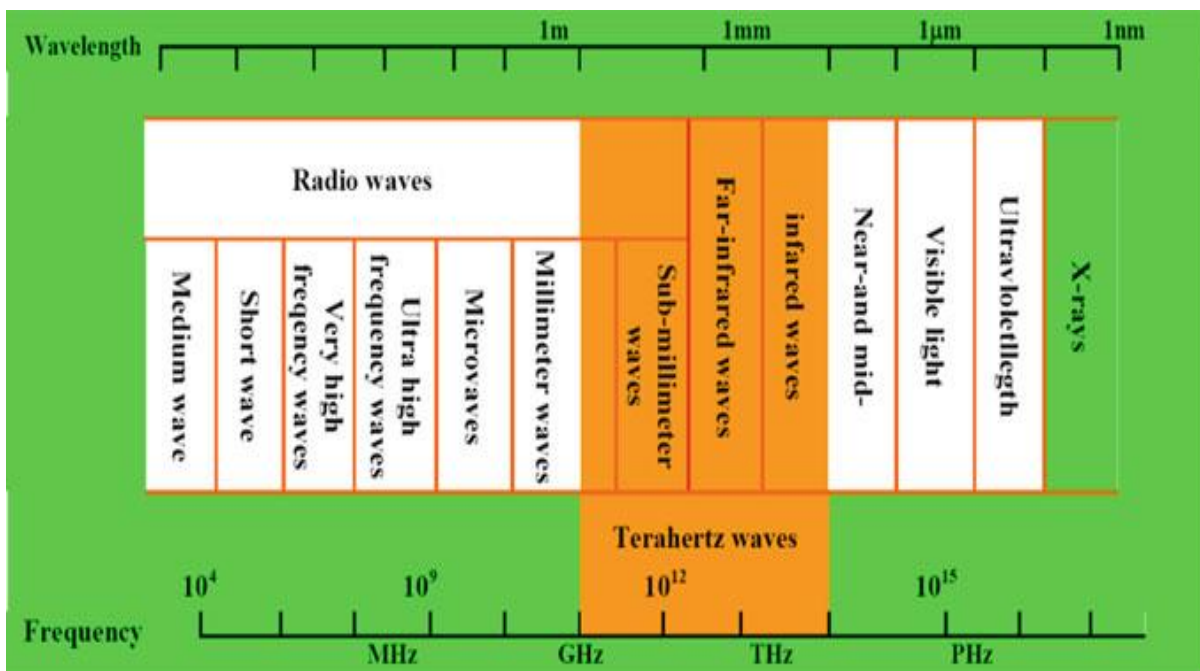
¹ lasing

² Chirped Superlattice

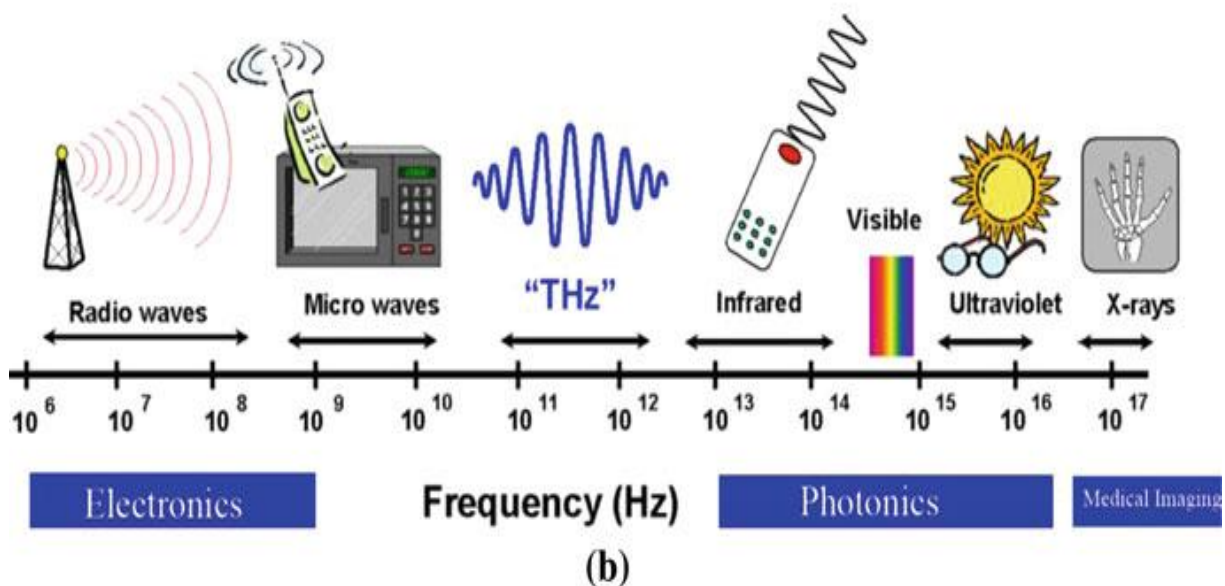
³ Resonant phonon depopulation



شود که بسیاری از مولکول ها مثل مونوکسید کربن ، آب ، نیتروژن و اکسیژن در ناحیه تراهرتز برخلاف نواحی اطراف دارای مشخصه های قوی و شدید جذب چرخشی و ارتعاشی هستند. بخصوص در مورد گازها شدت جذب نسبت به ناحیه مایکروویو ، 10^{-3} تا 10^6 بار بیشتر است. همچنین تشدیدهای دی الکتریک¹ که به صورت های گوناگون در مولکول های سنگین تری مثل پروتئین و DNA رخ می دهند می توانند در محدوده تراهرتز بررسی شوند.



(a)



(b)

شکل (۱-۲): نمایش محدوده تراهرتز در طیف الکترومغناطیس [۱۷]

¹ Dielectric Resonance