

به نام خدا

Vertical Cavity Surface Emitting Lasers
(VCSEL)

استاد راهنما: جناب آقای دکتر گل محمدی
نویسنده: عسگر حاجی بدلی

کلمات کلیدی

نیمه هادی - لیزر - چاه کوانتومی - بازتابگر براگ توزیع شده - لیزرهای VCSEL

چکیده

در این مقاله در مورد لیزرها، انواع آن ها و به طور خاص در مورد لیزر های گسیل سطحی کاواک عمودی (VCDLE) صحبت می شود.



WWW.ECA.IR

انجمن تخصصی برق و الکترونیک ایران

لیزرهای نیمه هادی	۳
انواع لیزرهای نیمه هادی	۳
VCSEL لیزرهای	۴
لیزرهای چاه کوانتومی	۶
مشکلات لیزرهای چاه کوانتومی	۷
بازتابگر براگ توزیع شده	۸
طراحی ساختار DBR	۸
روشها و مواد مورد استفاده در با طول موج بلند	۹
ساخت VCSEL	۱۰
ویژگیهای VCSEL	۱۱
کاربردهای VCSEL	۱۲
شکلهای مخصوص VCSEL	۱۲
لیزرهای VCSEL قابل تنظیم	۱۳
مدل کردن و تحلیل VCSEL	۱۴
تاریخچه و کارهای انجام گرفته در مورد VCSEL	۲۳
مراجع	۲۷

لیزر های نیمه هادی:

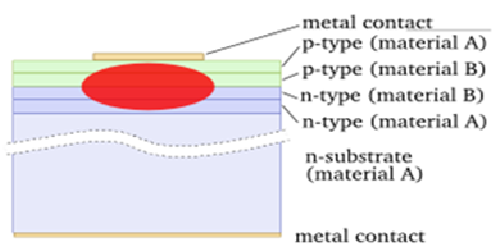
لیزر های نیمه هادی لیزر هایی هستند که در آنها ناحیه بهره از عناصر نیمه هادی است . بطور کلی بهره اپتیکی توسط گسیل تحریک شده در انتقال از باند هدایت به باند ظرفیت در شرایط وارونگی جمعیت بدست می آید. عموماً موادی که در لیزر های نیمه هادی و دیگر وسایل اپتو الکترونیکی بکار می روند بصورت زیر است .

GaAs (gallium arsenide)
AlGaAs (aluminium gallium arsenide)
GaP (gallium phosphide)
InGaP (indium gallium phosphide)
GaN (gallium nitride)
InGaAs (indium gallium arsenide)
InP (indium phosphide)
GaInP (gallium indium phosphide)

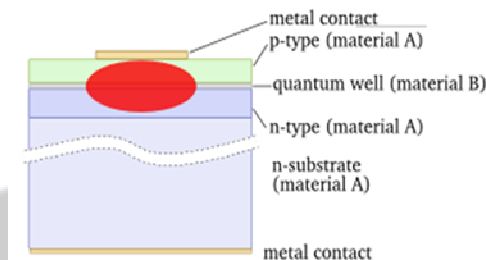
انواع لیزر های نیمه هادی :

- ۱- لیزرهای دیودی لبه گسیل کوچک که توان خروجی آنها در حد چند میلی وات است.
- ۲- لیزرهای دیودی با کاواک خارجی که شامل یک لیزر دیودی به عنوان ناحیه بهره است . طول موج این لیزر ها قابل تنظیم است و Linewidth گسیلی کوچکی دارند.
- ۳- دیود های لیزری Broad-area
- ۴- میله های دیودی توان بالا
- ۵- میله های دیودی پشته ای توان بالا
- ۶- لیزر های گسیل سطحی (VCSEL)، که تابش لیزری را در مسیر عمود بر ویفر گسیل می کنند ، توان خروجی در حد چند میلی وات است و کیفیت بیم خوبی دارند.
- ۷- لیزر های نیمه هادی گسیل سطحی با کاواک خارجی با پمپ نوری (VECSEL) ، با قابلیت توان خروجی در حد چند وات و کیفیت بیم بسیار خوب.
- ۸- لیزرهای Quantum cascade

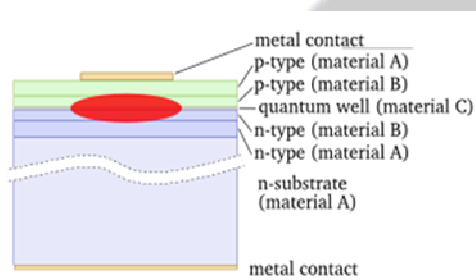
چند نمونه از لیزر های دیودی در شکل زیر آورده شده است .



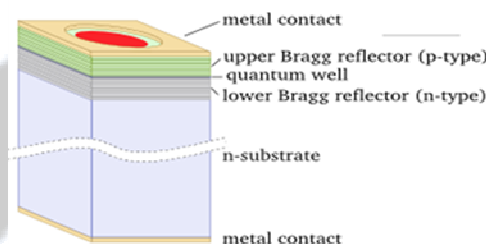
double heterostructure laser diode



simple quantum well laser



separate confinement heterostructure quantum well laser diode.



simple VCSEL structure.

لیزر های گسیل سطحی کاواک عمودی (VCSEL)

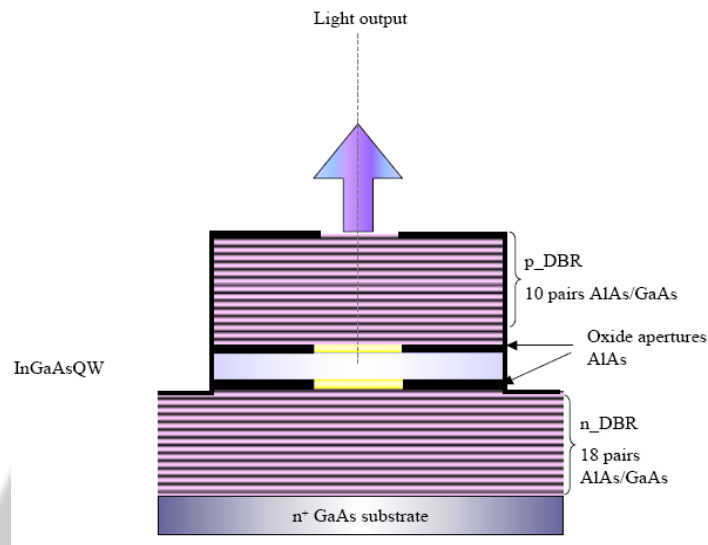
عبارت VCSEL از حروف اول عبارت Vertical Cavity Surface Emitting Laser گرفته شده است .

لیزر VCSEL در سال ۱۹۷۷ توسط پروفسور Kenichi Iga در انستیتو تکنولوژی توکیو اختراع شد. اولین کار لیزینگ و عملکرد آستانه پایین با میکرو کاواک به ترتیب در سالهای ۱۹۷۹ و ۱۹۸۷ بدست آمده است . تلاش بی وقفه و پژوهش مبتکرانه او تحقیقات جهانی بر روی VCSEL ها به راه انداخت و انجمن تحقیقات VCSEL-based Photonic شکل گرفت . بعد از کارکرد موج پیوسته در دمای اتاق VCSEL های GaAs و توصیف میکرو لیزر های چند میلی آمپری، تحقیقات VCSEL برای کاهش جریان آستانه و افزایش راندمان شتاب گرفت. مخصوصا پیشرفتهای کاری مهمی در Oxied-Confined VCSEL بدست آمد که روزنه اکسیدی دفن شده (buried oxied) را برای محدودیتهای الکتریکی و اپتیکی داخل کرد. واژه عمودی از این حقیقت ناشی می شود که در دیود های لیزری نوعاً مرزها بصورت افقی نمایش داده می شوند ، بنابراین به نظر می رسد خروجی VCSEL عمود بر این شکلها می باشد.

اصولاً یک لیزر گسیل سطحی نیازمند یک کاواک عمودی به همراه آینه های فوقانی و تحتانی می باشد . بنابراین، در چنین ساختاری میدان الکتریکی هم جهت با انتشار مد است. اگر بعد آن در راستای شعاع به اندازه کافی بزرگ باشد، می توان انتشار صفحه ای موج را فرض کرد. اما، اگر طول آن در راستای شعاع کاهش یابد، فرض مزبور صدق نمی کند. استفاده از ساختار کاواک عمودی ، ذاتاً فواید و ضرر هایی دارد . طول کاواک بسیار کوچکتر است و بنابراین ، فاصله فرکانسی بین مد ها افزایش می یابد. این امر خالص بودن مد ها را بهتر از یک کاواک لیزری برشی که طول کاواک آن ۱۰۰ میکرو متر است تضمین می کند . هر چند بهایی نیز برای آن با ید پر داخت کرد . از آنجایی که طول کاواک به شدت کاهش می یابد ، بهره رفت و برگشت کمتر خواهد شد . لذا چگالی آستانه بسیار بالاست.

ساختار VCSEL :

در شکل زیر یک شمای کلی از لیزر VCSEL نشان داده شده است .



لیزر VCSEL شامل آینه بالایی با بازتابش حدود ۹۹.۶٪ و آینه پایینی با بازتابش ۹۹.۹٪ است ، که این آینه ها از بازتابگر های براگ توزیع شده یک چهارم موج چاه کوانتومی هستند که با روش رونشستی ایجاد شده اند، ساخته شده است. همچنین ناحیه کاواک مابین دو آینه قرار گرفته است .

محور کاواک نوری در جهت شارش جریان است، در حالی که در لیزرهای دیودی متداول عمود بر شارش جریان است. طول ناحیه فعال در مقایسه با عرض آن خیلی کوتاه است بنابراین تابش، از سطح کاواک خارج می شود.

لایه های آینه های دی الکتریک با ضخامت ربع طول موج با ضریب شکستهای متناوب کم و زیاد به عنوان بازتابگر در دو طرف کاواک بکار رفته اند .برای حصول بازتاب بالای ۹۹٪ تعداد آینه های دی الکتریک مورد نیاز ۲۰ تا ۳۰ لایه است. لایه فعال گاهی بصورت تک چاه کوانتومی و معمولا بصورت چند چاه کوانتومی برای بهبود آستانه جریان بکار می رود.

ناحیه فعال ما بین clad و لایه های محدود کننده به ضخامت یک طول موج است .

برخی از مشکلات موجود بر سر راه دستیابی به لیزر های گسیل سطحی موثر شکل دهی اتصالات اهمی با مقاومت کم و تزریق جریان موثر می باشد . برای لیزر های با آستانه فوق العاده کم همچنین لازم است که حجم بهره کوچک و مد نوری تکی قابل حصول باشد . همه این خواص را می توان در لیزر های میکرو کاواک ، که قطر لیزر گسیل سطحی تا چند میکرون کوچک شده است بدست آورد.

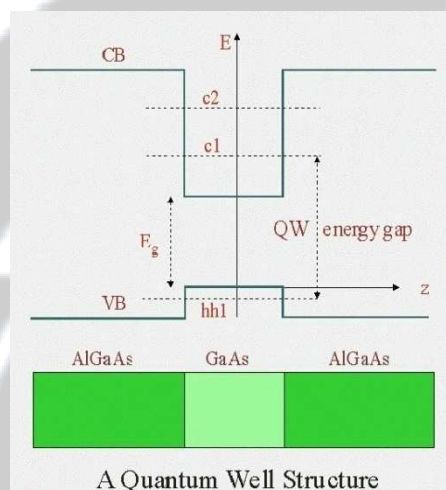
لایه فعال:

چندین روش برای ساخت لایه فعال وجود دارد که به چند نمونه از آنها در زیر اشاره شده است.

- لایه های فعال حجمی (Bulk)
- لایه های فعال چاه کوانتومی
- چاههای کوانتومی تکی
- چاههای کوانتومی چند تایی
- لایه های فعال چاه کوانتومی Strained layer

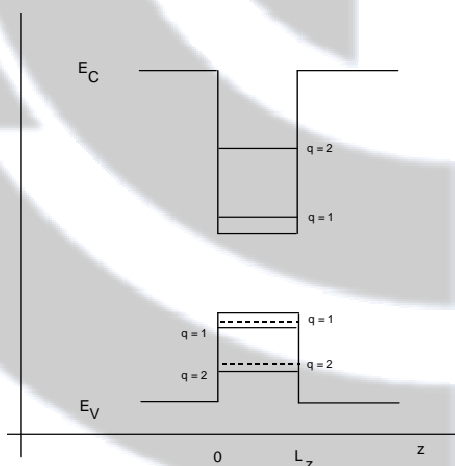
چاه کوانتومی :

چاه کوانتومی ، یک چاه پتانسیلی است که ذرات را در یک بعد محدود می کند و آنها را مجبور می کند تا یک ناحیه مسطح را اشغال کنند. چاههای کوانتومی در نیمه هادیها توسط موادی مانند گالیوم آرسناید ساندویچ شده توسط دو لایه از مواد با باندگپ پهن تر مانند آلومینیم آرسناید تشکیل می شوند. این ساختارها را توسط رشد molecular beam epitaxy با کنترل ضخامت لایه می توان ایجاد کرد. بخاطر طبیعت شبه دو بعدی آنها، الکترونها در چاههای کوانتومی چگالی مشخص تری از حالت های مواد bulk دارند.



لیزرهای چاه کوانتومی :

چاههای کوانتومی نیمه هادی در ناحیه فعال لیزر های دیودی یا لیزر های نیمه هادی سطح گسیل استفاده می شوند که دستیابی به آستانه پمپ کمتر با لایه های نازکتر را امکان پذیر می سازد.



$$E_n = E_{c2} + E_q \cong E_{c2} + \frac{\hbar^2 \left(\frac{q\pi}{L_z} \right)^2}{2m_n^*}$$

$$E_n = E_{v2} - E_q \cong E_{v2} - \frac{\hbar^2 \left(\frac{q\pi}{L_z} \right)^2}{2m_p^*}$$

مشکلات لیزرهای تک چاه کوانتومی :

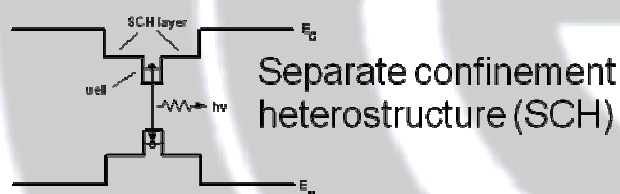
محدودیت نوری در چاه کم است و مقدار زیادی جریان تزریقی لازم است تا بهره اپتیکی کافی برای لیزینگ حاصل شود. وقتی چگالی جریان بالاست، حاملهای تزریقی از چاه ها سرریز می شوند. این اثرات مزایای چاه کوانتومی را کم می کند بنابراین ساختارهای جایگزین لازم است.

Separate confinement heterostructure (SCH) —

Graded refractive index SCH (GRIN-SCH) —

Multiple quantum well (MQW) —

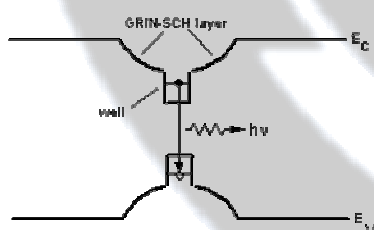
در شکلهای زیر چند نمونه ساختارهای دیگر آورده شده است.



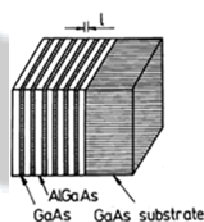
Separate confinement heterostructure (SCH)



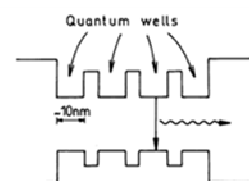
Multiquantum well laser (MQW)



Graded refractive index-separate confinement heterostructure (GRIN-SCH)



A multiple GaAs-GaAlAs QW structure. Each GaAs layer is about 10nm thick



Schematic band structure for a MQW laser like the laser chip shown at left.

بازتابگر براگ توزیع شده (DBR) :

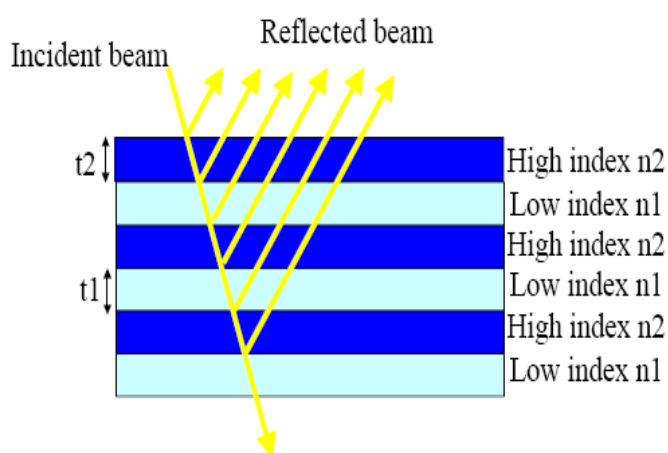
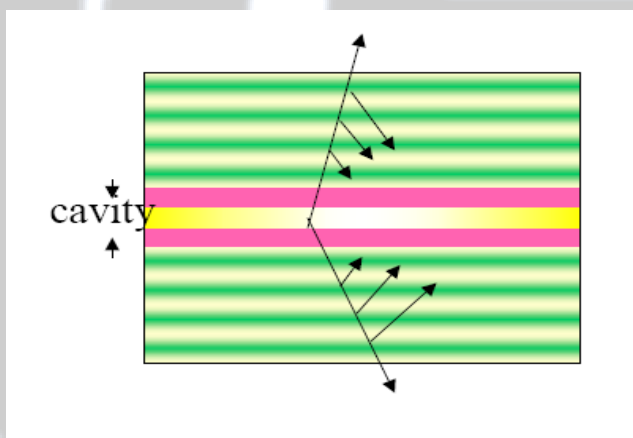
یک آینه براگ (آینه ربع موج هم گفته می شود) ساختاری است که شامل تکرار متناوب از لایه های دو ماده اپتیکی متفاوت است و ضخامت هر لایه اپتیکی مطابق با یک چهارم طول موجی است که آینه برای آن طراحی شده است. این شرایط برای تابش برخوردی نرمال است. اگر آینه برای زوایای بیشتر طراحی شود لایه های ضخیم تری لازم است.

در اپتیک موج هدایت شده، یک بازتابگر براگ توزیع شده، ساختاری است که از چند لایه های متناوب موادی با ضریب شکستهای متغیر، یا با تغییرات پریودیک چند مشخصه (مانند بلندی) یک موجبر دی الکتریک تشکیل شده است. در هر مرز لایه بازتابش جزئی موج نوری اتفاق می افتد و برای امواج با طول موج اپتیکی بیشتر باز تابشها با هم به صورت سازنده ترکیب می شوند.

طراحی ساختار DBR

برای طراحی یک DBR باید موارد زیر را در نظر گرفت :

- باز تابش بالا
- کنتراست ضریب شکست بالا
- سازگاری با لایه کوانتومی
- هدایت الکتریکی خوب
- مقاومت دمایی کم



روشها و مواد مورد استفاده در لیزر های VCSEL با طول موج بلند :

در جدول زیر مواد مورد استفاده برای ناحیه فعال و DBR برای لیزر های VCSEL در طول موجهای 1310nm و 1550nm داده شده است.

Wavelength	Active/DBR Materials	Comment
1310 nm	GaInAsP/AlGaInAsP on InP	Monolithic DBR have low index contrast—need many periods Low modal gain from quantum well
	GaInAsP/AlGaAs (wafer bond)	Excess voltage?
	GaInAsN/AlGaAs	Material gain : As N increases, radiative efficiency decreases
	InAs quantum dots	Sufficient material gain?
1550nm	GaInAsP/AlGaInAsP on InP	Monolithic DBR have low index contrast—need many periods Low modal gain from quantum well
	GaInAsP/AlGaAsSb on InP	Extremely reactive Sb-containing DBRs.
	InGaAsN/AlGaAs	Sufficient gain at long wavelength?
	InAs quantum dots	Sufficient gain at long wavelength?

روشهای ساخت لیزر های VCSEL :

- Etched air-post VCSEL's
- Ion-implanted VCSEL's
- Selectively oxidized VCSEL's. (most commonly used)

در شکل زیر مراحل ساخت یک لیزر VCSEL نشان داده شده است.

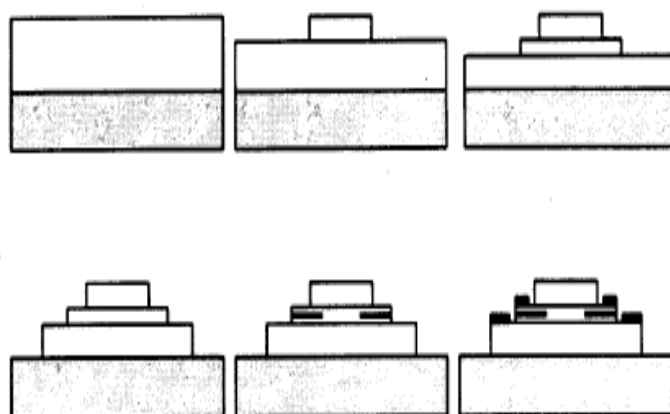


Fig. 1. Schematic overview of fabrication steps for the wet-oxidized QD VCSELs.

لایه های نیمه هادی با استفاده از رشد epitaxial بر روی یک زیر پایه ای که در طول موج گسیلی شفاف است ساخته می شود. برای مثال در یک VCSEL با طول موج 980nm ، از لایه فعال InGaAr برای تولید گسیل 980nm در طول زیر پایه کریستالی GaAr که در 980nm شفاف است ، استفاده می شود. لایه های متناوب AlGaAr با ترکیبهای مختلف باند گپها و ضریب شکستهای متفاوتی به وجود می آورند که به عنوان آینه های دی الکترک استفاده می شوند.

آینه های دی الکتریک بالا بعد از اینکه تمام لایه های دیگر بصورت epitaxially بر روی زیر پایه GaAr رشد داده شدند، etch می شوند. کاواک عمودی نوعاً سطح مقطع دایروی دارد و باعث می شود که بیم گسیلی سطح مقطع دایروی داشته باشد. گاهی اوقات گسیل از سطح مربعی است . واگرایی بیم ۷ تا ۱۰ درجه است . با استفاده از میکرو لنز ها می توان ۹۰٪ شار خروجی را به فیبر کوپل کرد . ارتفاع کاواک کوچک است (چند میکرون) و فقط یک مد طولی مجاز می باشد با این حال امکان یک یا چند مد عرضی وجود دارد معمولاً در عمل فقط یک مد عرضی در طیف خروجی کاواک با قطر کمتر از 0.8 میکرو متر وجود دارد . VCSEL هایی با چندین مد عرضی نیز وجود دارند (پهنای طیفی 0.5nm)

ویژگیهای VCSEL :

- هزینه ساخت کم
- مصرف توان کم
- قابلیت تست روی ویفر
- کوپل آسان و بازده بالای کوپل سیگنال به فیبر (بخاطر سطح مقطع دایروی)
- قابلیت تولید به صورت آرایه ای
- قابلیت دستیابی به لیزر تک مد
- طول موج تنظیم پذیر
- توان گسیلی کمتر در مقایسه با لیزر های لبه گسیل
- پهنای باند مدولاسیون ذاتی بالا (نرخ مدولاسیون در حد گیگا هرتز)
- عملکرد با سرعت بالا
- کارکرد با جریان آستانه کم
- قابلیت مجتمع سازی
- بیم خروجی دایروی
- عمر کاری ۱۰۰۰۰۰ ساعتی (اگر دمای آن بخوبی کنترل شود)
- واگرایی کم
- پایداری حرارتی خوب
- VcSEL هایی برای گسیل انرژی از 850nm تا 2000nm ساخته شده اند

امروزه Gigabit Ethernet و کانالهای فیبری بازارهای اصلی برای VCSEL ها هستند ، ماحولهای VCSEL based 10-G Ethernet در حال حاضر آماده برای سیستمهای عملی هستند. VCSEL های GaAs ، 850nm برای این کاربردها ساخته شده اند . به عبارت دیگر ، VCSEL های با طول موج بلند پیوسته در سال ۱۹۹۳ محقق شده اند ، امروزه VCSEL های با طول موج بلند که در طول موج 1200-1300nm گسیل می کنند برای استفاده در فیبرهای نوری تک مد در کلان شهرها و شبکه های گسترده مورد توجه هستند . VCSEL های ارزان قیمت و پر کاربرد گسیلنده در ۱.۳ میکرو متر می توانند نقش مهمی در کاهش قیمت در لینکهای پر سرعت چندین کیلومتری با فیبرهای تک مد داشته باشند . بالا ترین سرعت مدولاسیون برای VCSEL های GaInAs به 25Gb/s رسیده است .

کاربر های VCSEL :

- سیستمهای اپتو الکترونیکی
- پردازش اطلاعات نوری
- انتقال اطلاعات با فیبر نوری
- انتقال سیگنالهای آنالوگ
- طیف نگاری جذبی
- پرینتر های لیزری
- ذخیره اطلاعات نوری
- حسگر های ردیابی گاز
- استفاده برای پمپ لیزر های دیگر
- آشکار سازی بخار آب

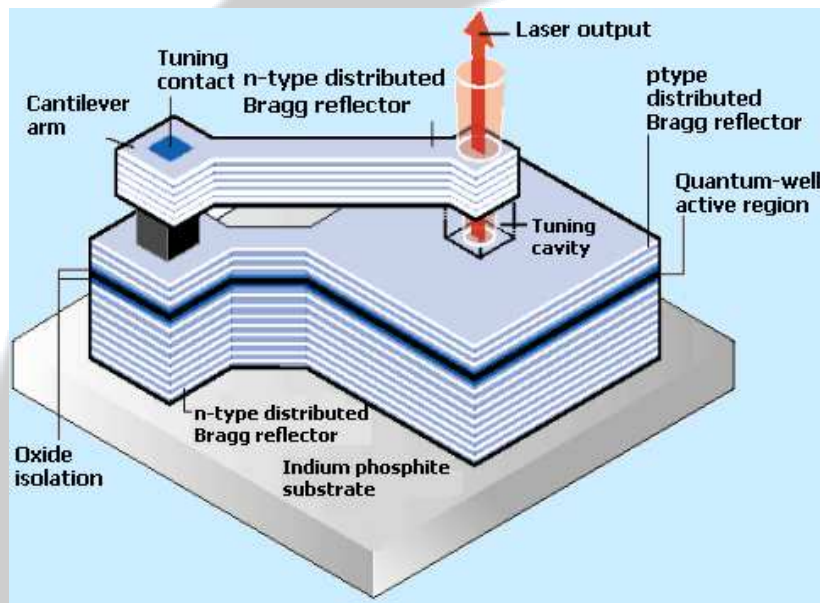
شکلهای مخصوص VCSEL :

- Multiple active regions
- VCSELs with tunnel junctions
- Widely tunable VCSEL with micromechanically (MEMS) movable mirror
- *Wafer-bonded* or *wafer-fused* VCSEL
- Monolithically optically pumped VCSELs
- VCSEL with longitudinally integrated monitor diode
- VCSEL with transversally integrated monitor diode
- VCSELs with external cavities, known as VECSELs or semiconductor disk lasers

لیزر های VCSEL قابل تنظیم :

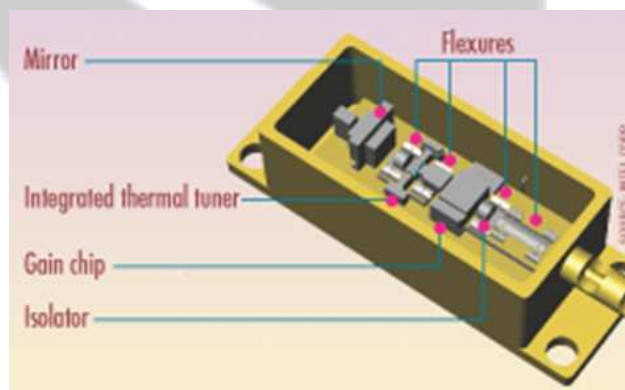
مکانیزم های تنظیم :

- دما : افزایش یا کاهش دمای مواد، طول موج انتقالی لیزر را تغییر می دهد.
- جریان : تزریق جریانهای متعدد برای تغییر طول موج لیزر استفاده می شود.
- مکانیکی : تکنیکی که اخیراً استفاده می شود، استفاده از سیستمهای میکرو الکترو مکانیکی برای تنظیم طول موج لیزر است.

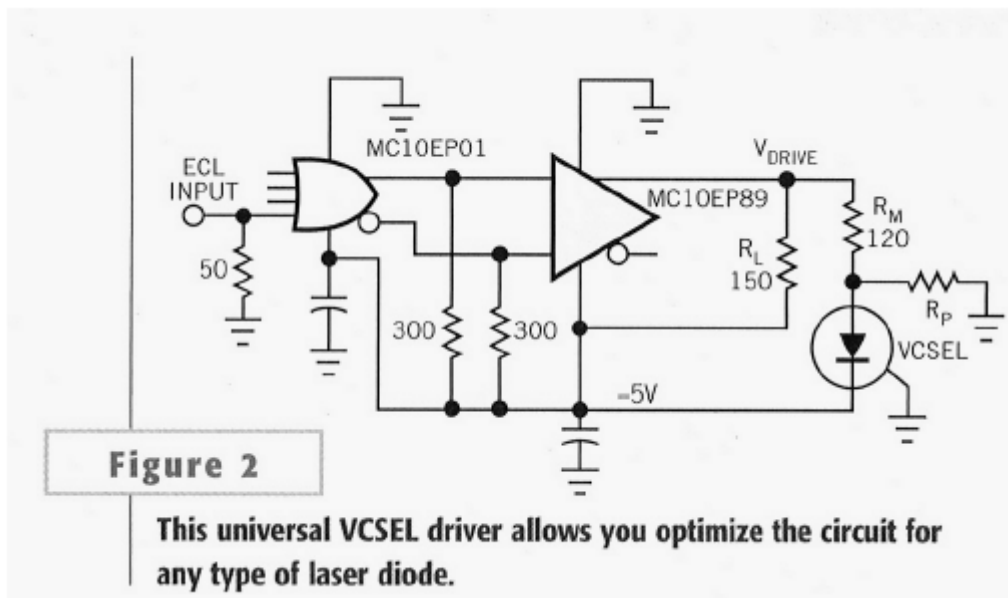


: VECSEL

VECSEL ها بصورت اپتیکی با دیود های لیزری پمپ می شوند و توان بیشتری به بزرگی 30W می توان بدست آورد. کاواک خارجی تکنیکهایی نظیر frequency doubling، single frequency operation و Femtosecond pulse Modelocking را مقدور می سازد. در شکل زیر یک نمونه از VECSEL نشان داده شده است.



مدار درایو VCSEL :



مدل کردن و تحلیل VCSEL :

مدل کردن دقیق VCSEL برای مهندسان و طراحان مدار موضوع خیلی مهمی است .

در کل دو روش برای مدل کردن نوری لیزر های نیمه هادی وجود دارد : الف) مدل های اسکالر ب) مدل های برداری از مدل های اسکالر می توان از مدل ضریب موثر (EIM) که توسط Hadley ابداع شده است و مدل فرکانس موثر (EFM) که توسط Wenzel و Wunsche پیشنهاد شده است ، نام برد. مدل برداری برای اولین بار توسط Thode و همکاران او پیشنهاد شد ، و بعد از آنها روش خط Methode Of Line (MOL) توسط Pregla ابداع شده است.

در زیر روش فرکانس موثر (EFM) برای تحلیل لیزر VCSEL توضیح داده شده است.

روش ضریب موثر (EIM) برای تعیین تقریبی مدهای موجبر لیزر های نیمه هادی لبه گسیل استفاده شده است. بخاطر سادگی ، این روش کاربردهای گسترده ای پیدا کرده است و بطور قابل توجهی اغلب نتایج آن خیلی دقیقتر از آن چیزی است که مورد انتظار است . در EIM معادلات موج دو بعدی در صفحه عرضی (عمود بر انتشار موج) به دو معادله یک بعدی برای بعد های عمودی و افقی جدا می شود. مقادیر ویژه معادلات عمودی، ثابت های انتشار موجبر های مرجع صفحه ای می باشند که همانند ساختار های عمودی موجبر اصلی در هر موقعیت جانبی هستند. مجموعه این ثابت های انتشار پروفایل ضریب موثر عرضی را تشکیل می دهند که بعداً در معادلات موج افقی برای تعیین ثابت انتشار مودال استفاده خواهد شد. در VCSEL ، نور بصورت عمودی و نه بصورت موازی با لایه ها انتشار می یابد . بنابراین ثابت های انتشار موجبر های مرجع صفحه ای مفید نیستند. بنابراین در VCSEL هم یک روش شبیه به EIM می تواند استفاده شود. ایده اصلی جدا کردن معادلات موج سه بعدی به معادلات یک بعدی و دو بعدی به ترتیب برای ابعاد عمودی و صفحه ای است. اولین بار این روش توسط Hadley پیشنهاد شد. مقادیر ویژه معادلات عمودی که اینجا فرکانس های ویژه کاواکها شامل توده هایی از لایه های مسطح است ، اکنون فرکانس موثر در هر موقعیت عرضی را معین می

کند. پروفایل فرکانس موثر بدست آمده در معادلات صفحه ای برای تعیین بهره آستانه و طول موج لیزینگ استفاده می شود. به این دلیل، ترجیح داده می شود که این روش را روش فرکانس موثر (EIM) بنامند.

هدف این مقاله دو مورد است. اولاً، استخراج معادلات EFM که بر پایه مفهوم فرکانسهای مد مختلط است، ارائه داده می شود.

این موضوع به ما اجازه می دهد تا پاشندگی زمانی تابع دی الکتریک را به حساب بیاوریم و اعتبار معادلات توصیف کننده انتشار نور عمود بر لایه ها را بررسی کنیم. ارائه یک عبارت متغیر برای معادله موج ما را به یک معادله صفحه ای واحد راهنمایی می کند. دوماً، این روش برای یک VCSEL با طول موج بلند بکار برده می شود و بهره آستانه و طول موج لیزینگ محاسبه می شود. در نتیجه، مطابقت ها و تفاوت های مکانیزمهای موج بری در VCSEL و EESL را توضیح می دهیم.

EFM با پاشندگی:

بیشتر VCSEL ها شکل هندسی تقریباً مسطحی دارند که بالایه های epitaxial مشخص می شوند و میدان تابشی متناسب با آن به طور خطی در این صفحه پلاریزه شده است.

$$\left[\Delta + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(r, \omega) \right] E(r, \omega) = 0 \quad (1)$$

بنابراین، یک معادله موج اسکالر می تواند برای مولفه های الکتریکی اصلی میدان نوری استفاده شود. وضعیت های دیگر به روش مشابه می تواند بحث شود. معادلات موج باید توسط شرایط مرزی اختصاصی کامل شود. برای سادگی، پیوستگی E و مشتق طبیعی آن در تمام فصل مشترکها ما بین مواد متفاوت لازم است. البته این برای سادگی است. شرایط مرزی دقیقتر در فصل مشترکهای عمودی برای مثال می تواند در نوع چند برداری معادلات موج اسکالر بحث شود. با این حال این موضوع سوای هدف این مقاله است. در سطوح، شرایط مرزی باید تمام جوابهای متعلق به تابش گسیلی لیزر در حالت free-running، را در برگیرد. بنابراین، فقط امواج خروجی اجازه خروج از وسیله را دارند.

پارامتر ω به عنوان مقدار ویژه معادله (1) بکار میرود و باید به نحوی انتخاب شود تا شرایط مرزی برآورده شود. این عمل مد های ویژه متفاوت وسیله را معین می کند. میدانهای نوری این مدها فقط توسط فاکتور نمایی $\exp(i\omega t)$ به زمان وابسته است. در کل بهره، تلفات و افت شدتهای مد را جبران نمی کند. بنابراین، فرکانس مد ω عدد مختلطی خواهد بود. به ترتیب، قسمت حقیقی و موهومی آن، طول موج مودال و ثابت افت را تعیین می کند. زیر مقدار آستانه $\text{Im}\omega > 0$ است. زیرا تمام مدها افت می کنند. با افزایش بهره در کاواک، این افت کاهش پیدا می کند، یعنی $\text{Im}\omega$ کوچکتر می شود. آستانه لیزر وقتی حاصل می شود که کوچکترین مقدار $\text{Im}\omega$ نزدیک صفر می شود.

در معادله (1) تابع دی الکتریک بستگی به فرکانس دارد. در این روش، پاشندگی زمانی که توسط Hadley نادیده گرفته شده بود در حوزه فرکانس توصیف می شود. برای بدست آوردن یک معادله که در مقدار ویژه تعیین شده خطی است. حول یک مقدار حقیقی فرکانس مرجع ω_0 بسط می دهیم.

$$\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(r, \omega) \approx \frac{\omega_0^2}{c^2} n^2(r) + 2 \frac{\omega_0}{c^2} n(r) n_g(r) (\omega - \omega_0) \quad (2)$$

اینجا، فاز شکستی مختلط و ضرایب گروه را معرفی می کنیم.

$$n(r) = \sqrt{\varepsilon(r, \omega_0)}$$

$$n_g(r) = \frac{\partial}{\partial \omega} [\omega \sqrt{\varepsilon(r, \omega)}]$$

حذف عبارات درجه بالاتر امکان پذیر است زیرا مدهایی که جستجو می کنیم در کل فقط ثابتهای افت کوچکی دارند و انحراف از فرکانس مرجع ω_0 را می توان توسط انتخاب صحیح ω_0 ، کوچک نگه داشت. بجای معادله (۱) باید معادله زیر را حل کنیم.

$$[\Delta + k_0^2 n^2(r)]E(r) = \nu k_0^2 n(r) n_g(r) E(r) \quad (۳)$$

که $k = \omega_0/c$ عدد موج خلأ است و پارامتر فرکانس بدون بعد را به صورت زیر معرفی می کنیم :

$$\nu = 2 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 2 \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} - i \frac{2IM\omega}{\omega_0} \quad (۴)$$

که الان نقش مقدار ویژه را بازی می کند . قسمت حقیقی این پارامتر شیفت طول موجی وابسته را ارائه می دهد ، از آنجا که قسمت موهومی ثابت افت نسبی وابسته به مد متناظر می باشد .

توجه می کنیم که معادله (۳) از معادله موج معمولی در حاصلضرب متغیر $n(r)n_g(r)$ که به مقدار ویژه در طرف راست ضرب شده است ، فرق می کند. در این مقاله ، یک راه حل تقریبی از (۳) بر مبنای جداسازی متغیرهای استوانه ای $r = r(r, z, \varphi)$ ارائه می شود. با این حال ، این موضوع تنها در صورتی امکان پذیر است که شرایط مرزی مربوط به امواج خروجی قابل جدا شدن باشند. فرض می کنیم که در صفحه پایین ($z = 0$) و بالای ($z = L$) صفحه کاواک لیزر ، تابش اساساً در مسیرهای طبیعی مربوطه گسیل می شود. بعلاوه با انتخاب مناسب مقدار $r = r_\infty$ که ε ثابت است ، فرض می کنیم که حل (۳) را می توان با موج استوانه ای خروجی تخمین زد ، بنابراین ، شرایط مرزی ،

$$\frac{\partial E}{\partial z} \pm ik_z E = 0 \quad \text{و} \quad z = \begin{cases} L + \varepsilon \\ 0 - \varepsilon \end{cases} \quad (۵)$$

$$\frac{\partial E}{\partial r} + \frac{E}{2r} + ik_r E = 0 \quad \text{و} \quad r = r_\infty \quad (۶)$$

که ε یک عدد مثبت کوچک است. عدد موج kz و kr باید معین شود. برای مثال ، اگر لیزر به فضای آزاد گسیل کند،

$$k_z = \omega/c = k_0 (1 - \nu/2)$$

بطوریکه در روشهای ضریب موثر معمولی ، میدان نوری به طور تخمینی به شکل زیر است .

$$E(r) = f(z, \rho) \Phi(\rho) \quad (۷)$$

که $\rho = (r, \varphi)$ مولفه واقع در صفحه r می باشد. تابع f به صورت فرضی بصورت زیر نرمالیزه شده است.

$$\int_0^L f^2 dz = 1 \quad (8)$$

و نیاز دارد که در هر موقعیت ρ تکمیل شود.

$$\left[\frac{d^2}{dz^2} + k_0^2 n^2(r) \right] f(z, \rho) = v_{eff}(\rho) k_0^2 n(r) n_g(r) f(z, \rho) \quad (9)$$

معادله (۳) بدون مشتقات صفحه ای است، یعنی v_{eff} ، توزیعهای میدان و پارامترهای فرکانس پشته های مجازی لایه های مسطح هستند، ساختارهای عمودی آنها در موقعیتهای مختلف ρ هستند.

تابع واقع در صفحه Φ باید در معادله زیر صدق کند.

$$\left[\frac{\Delta \rho}{k_0^2 \langle n n_g \rangle \rho} + v_{eff}(\rho) \right] \Phi(\rho) = v \Phi(\rho) \quad (10)$$

$$\langle n n_g \rangle \rho = \int_0^L n(r) n_g(r) f^2(z, \rho) dz \quad (11)$$

معادلات (۹) و (۱۱) نتایج اصلی این بحث است، وابستگیهای آنها به مدل ضریب موثر Hadley برای VCSEL و روشهای ضریب موثر چیست؟

با نادیده گرفتن علامت گذارهای متفاوت، معادلات Hadley (۶) - (۴) از معادلات ارائه شده در این مقاله در سه چیز فرق می کند. اولاً، معادله درون صفحه او (۶) شامل مشتق زمانی بجای مقادیر ویژه در سمت راست معادله (۱۰) است.

این مورد تفاوت اصلی نیست، زیرا این مشتق دقیقاً عبارت ما را در مورد وابستگی زمانی نمایی مد ها تولید خواهد کرد.

دوماً، میانگین آن مربوط به (۱۱) با $|f|^2$ بجای f^2 انجام شده است.

هر دو عبارت توسط بخش عمودی فاکتور Peterman (k) تفاوت دارند، که در وسیله های با آینه های بازتابگر بالا نزدیک واحد است. با این حال، این تفاوت بطور طبیعی اهمیت عملی کمتری دارد بطوریکه مثال نشان خواهد داد تفاوت سوم با Hadley این است که ما پاشندگی ثابتهای نوری را به حساب آورده ایم، که یک ثابت گروه را در معادلات (۹) و (۱۰) در چند موقعیت تولید می کند. اگر این ثابتهای گروه توسط ضریبهای فاز جایگزین شوند، معادلات Hadley بدست می آیند. شمول پاشندگی از علایق آکادمیک است بخاطر اینکه ضرایب گروه نیمه هادیها ی مربوط بیشتر از 10٪ بزرگتر از ضریبهای فاز است. اگر به خاطر سادگی n_g / n ثابت فرض شود نتایج می تواند تقریب زده شود. در (۹) این فاکتور به نظر می رسد تنها در سمت راست به $v_{eff}(\rho)$ ضرب شده است، بنابراین پاشندگی $v_{eff}(\rho)$ را با n_g / n کاهش می دهد. به عنوان یک نتیجه، جمله داخل براکت در سمت چپ (۱۰) و مقدار ویژه V توسط این فاکتور کاهش داده شده است. بنابراین، پاشندگی هر شیفت طول موجی را صرفنظر از دلیلش (چگالیهای متغیر، دما و...) با

فاکتور n_g / n کاهش می دهد. خلاصه اینکه، استخراج این معادلات نظریه اصلی مدل ضریب موثر Hadley برای VCSEL را تأیید می کند و توسط شمول اثرات مهم پاشندگی، آن را بسط می دهد.

همچنین معادلات (۹) و (۱۰) خیلی شبیه معادلات روش ضریب موثر عمودی برای محاسبه انتشار مدها در طول موجبر است.

تفاوت اصلی نقش پروفایل ضریب موثر است که توسط پارامتر فرکانس موثر $V_{eff}(\rho)$ به عهده گرفته شده است. قبلاً Hadley تأکید کرده است که پروفایل ضریب موثر برای VCSEL توسط تغییرات مکانی در فرکانسهای رزونانس Fabry-Perot معین می شود.

در این متن، جالب است تا معادله (۱۰) را با معادله شرودینگر مقایسه کنیم. در واقع محدود کننده پتانسیل میدان، پروفایل فرکانس موثر $V_{eff}(\rho)$ است نه پروفایل ضریب $\langle nn_g \rangle \rho$

جایگزینی آخر فقط نقش جرم موثر با تغییرات فضایی ضعیف را بازی می کند. به این دلیل، استفاده از علامت گذاری روش فرکانس موثر بجای روش ضریب موثر پیشنهاد می شود.

در بیشتر موارد عملی وسایل تقارن محوری دارند، یعنی توزیع محوری n و n_g وجود دارد. در این مورد Φ باید به شکل زیر باشد.

$$\Phi(\rho) = \Phi_l(r) e^{il\varphi} \quad (12)$$

با جایگذاری (۱۲) در (۱۰) و نوشتن لاپلاسین دو بعدی $\Delta\rho$ در مختصات استوانه ای منجر به معادله زیر خواهد شد.

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \frac{l^2}{r^2} + V_{eff}(r) k_0^2 \langle nn_g \rangle_r \right] \Phi_l(r) = \nu k_0^2 \langle nn_g \rangle_r \Phi_l(r) \quad (13)$$

$$l = 0, 1, 2, \dots$$

جوابهای مختلف (۱۳) مدهای LP_{lm} نامیده می شوند و $m=1,2,3,\dots$ که مد LP_{0l} اصلی مطابق با مدهای HE_{1l} زوج و فرد است.

در مد LP_{11} مرتبه بعدی چهار مد مخفی است. (HE_{21} زوج و فرد، TE_{01} و TM_{01}) که اگر اثرات پلاریزاسیون نادیده گرفته شود، مقادیر ویژه یکسانی دارند. در $r=0$ مدهای LP_{01} و LP_{11} به ترتیب باید از شرایط مرزی پیروی کنند.

$$\Phi_0(0) = 1, \frac{d\Phi_0(0)}{dr} = 0 \quad (14)$$

$$\Phi_1(0) = 0, \frac{d\Phi_1(0)}{dr} = 1 \quad (15)$$

ویژگیهای EFM در مقایسه با دیگر روشها به طور خلاصه بصورت زیر است

(۱) در مقایسه با روش ضریب موثر متداول، فرکانسهای رزونانس موثر، تشدیدگرهای عمودی صفحه مجازی بجای ضریبهای موثر موجبرهای صفحه مجازی ظاهر می شوند.

(۲) این روش به علت دخالت دادن پاشندگی زمانی تابع دی الکتریک کلی تر از روش Hadley است.

بجای حل معادله وابسته به زمان، مقادیر ویژه مختلط V معادله مستقل زمان معین می شود که طول موجهای رزونانس را ارائه می دهد و ثابتهای مدهای کلی رزوناتور را از بین می برد.

(۱) در معادله (۱۰) به علت وجود تلفات و بهره، تابع وزن f^2 و نه $|f^2|$ وجود دارد.

(۲) معادله (۱۰) شکل یک معادله موجبر را ندارد، این فرض طبیعی به نظر می رسد.

در ادامه، کاربرد EFM در VCSEL توضیح داده می شود.

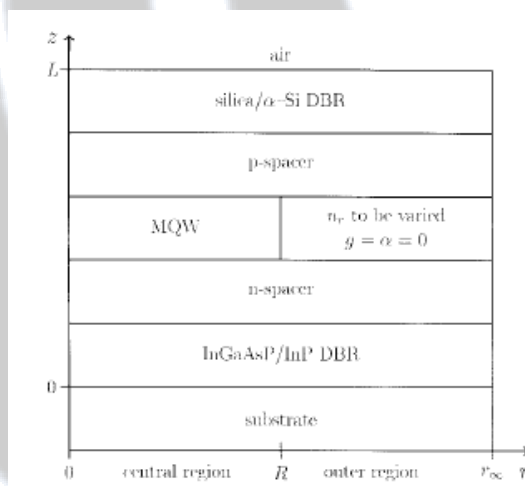
کاربرد در VCSEL:

در شبیه سازی لیزر ها، هدف نهایی محاسبه طول موج لیزینگ و توان خروجی به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی است. به این دلیل مدل کردن وابستگی تابع دی الکتریک بر روی چگالیهای حامل و دما لازم است و برای محاسبه توزیع چگالی حامل و دما و برای محاسبه توزیع چگالی حامل و دما با میدان اپتیکی لازم است.

در این مقاله تمرکز بر روی محاسبه مدهای اپتیکی است. بنابراین، جزئیات انتقال حامل و شار گرمایی با استفاده از بهره اپتیکی ثابت در چاههای کوانتومی فعال VCSEL حذف شده است. هدف محاسبه بهره آستانه و طول موج لیزینگ مد LP01 اصلی متغیر با هندسه و شکل ضریب یک ساختار VCSEL مدل است.

الف) وسیله مدل:

در این مقاله، یک VCSEL با طول موج بلند در نظر گرفته شده است، که در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) نمایش ماتریکی از VCSEL مدل، استفاده شده در محاسبات

این وسیله شامل ۱۲ چاه کوانتومی فعال و ۱۳ سد ساندویچ شده بین لایه های spacer، از نوع Doped InP شده با p_{on} است و یک بازتابگر براگ توزیع شده $(DBR)SiO_2-Si$ در بالا و یک $InGaAsP-InP$ DBR در پایین است. بیرون ناحیه مرکزی با شعاع $r=R$ ، ساختار عمودی یکسان است به استثنای اینکه MQW توسط یک لایه با بهره و جذب کم جایگزین شده است.

ضریب فاز مختلط را می توان بصورت زیر نوشت:

$$n = n_r + i \frac{g - \alpha}{2k_0} \quad (16)$$

و ضریب گروه مختلط را بصورت زیر

$$n_g = n_{g,r} + i \frac{g_\omega - \alpha_\omega}{2k_0} \quad (17)$$

با $g_\omega = \omega(\partial g / \partial \omega)$ و $\alpha_\omega = \omega(\partial g / \partial \omega)$ در $\omega = \omega_0$ داده شده، بهره اپتیکی g فقط در چاههای کوانتومی غیر صفر است. قسمتهای حقیقی ضرایب فاز n_r و ضرایب گروه $n_{g,r}$ ، ضرایب جذب α و ضخامت d لایه های مختلف در جدول (۱) داده شده است.

VALUES OF THE PARAMETERS USED IN THE CALCULATIONS

Layer	n_r	$n_{g,r}$	α/cm^{-1}	d/nm
substrate	3.17	3.4	1.54	∞
$42.5 \times \left\{ \begin{array}{l} \text{InGaAsP} \\ \text{InP} \end{array} \right.$	3.46 3.17	4.4 3.4	1.54 1.54	112.0 122.2
n-spacer	3.17	3.4	1.62	273.2
$12.5 \times \left\{ \begin{array}{l} \text{barrier} \\ \text{QW} \end{array} \right.$	3.34 3.62	3.8 3.7	0 1200	6 7
p-spacer	3.17	3.4	26.43	874.7
$5 \times \left\{ \begin{array}{l} \text{silica} \\ \alpha\text{-Si} \end{array} \right.$	1.44 3.30	1.44 3.30	0 1000	269.1 117.4
air	1	1	0	∞

جدول (۱)

فرض می شود که جذب (حامله های آزاد و جذب باند ظرفیت) فقط بصورت ضعیف به طول موج بستگی دارد و قرار می دهیم $\alpha_\omega = 0$. به علت اثرات گرمایی پیک بهره به طول موجهای بلند تر شیفต์ پیدا می کند. بنابراین، فرض می شود که VCSEL مدل در شیب طول موجی کوتاه منحنی بهره $g(\lambda)$ کار می کند. به عنوان یک مقدار نوعی، $g_\omega = -10^4 \text{ cm}^{-1}$ قرار می دهیم.

ب) روش عددی برای محاسبه آستانه :

روش محاسبه به این صورت است ، ابتدا معادله (۹) با روشی شبیه ماتریس انتقال حل می شود ،

ثانیاً معادله (۱۳) برای بهره اپتیکی داده شده در چاههای کوانتومی فعال توسط انتگرال گیری مرتبه ۴-رنگ-کوتا حل می شود دوباره با روش مختلط نیوتون برای محاسبه مقدار ویژه ترکیب می شود .

ثالثاً بهره آستانه بادر نظر گرفتن

$$\text{Im} \nu = 0 \quad (18)$$

و استفاده از روش Brent's بدست می آید .

سپس طول موج لیزینگ با رابطه زیر داده می شود

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \frac{\text{Re}(\nu)}{2} \right] \quad (19)$$

که λ_0 طول موج مرتبط با فرکانس مرجع ω_0 است. در این مورد طول موج گسیلی $\lambda_0 = 1.55 \mu m$ است .

کل روش خیلی سریع است و فقط چند تکرار در هر مرحله انجام می گیرد . مرحله دوم و سوم را می توان ترکیب کرد ، ولی برای اهداف بعدی جدا از هم نگه داشته می شود.

ج) تاثیر پاشندگی :

با نادیده گرفتن پاشندگی ضریب شکست ، شیفت طول موجی $\lambda - \lambda_0 = -7.4 nm$ برای $R = \infty$ بجای

$6.6 nm$ - با پاشندگی بدست می آید با قرار دادن $g_{\omega} = 0$ ، بهره آستانه $1805 cm^{-1}$ بجای $1842 cm^{-1}$ محاسبه می شود. بخاطر مطالعه تاثیر تابع وزن ، تابع وزن f^2 را توسط $|f^2|$ جایگزین می کنیم. برای VCSEL مدل ، تقریباً هیچ تغییری در طول موج لیزینگ وجود ندارد و فقط اندکی مقدار بهره آستانه تغییر داده شده است . بنابراین ، استفاده از $|f^2|$ ، موجب هیچ خطای قابل ملاحظه ای نمی گردد. این موضوع تا زمانی پا برجاست که قسمت حقیقی \mathcal{E} ، جهت انتشار نور را که عمود بر لایه ها است تعیین می کند . یعنی اثر قسمت موهومی \mathcal{E} بر روی f می تواند نادیده گرفته شود ، این شرایط معمولاً اعمال می شود

(د) رفتار اختلالی:

اگر به تابع دی الکتریک اصلی $\mathcal{E}(r)$ اختلال کوچک $\Delta \mathcal{E}(r)$ اضافه شود . با استفاده از تئوری اختلال مرتبه اول و با نادیده گرفتن عبارت سطحی کوچک (که در اثر عبارت دوم در سمت راست (A1) است)

$$\Delta v_{eff} = \frac{2\langle n\Delta n \rangle - v_{eff}\langle n_g\Delta n \rangle - v_{eff}\langle n\Delta n_g \rangle}{\langle nn_g \rangle} \quad (21)$$

به عنوان مثال ، بهره اپتیکی و مشتق آن نسبت به ω ، به صورت اختلالی مورد بحث قرار گرفته است ، به این معنی که g در $n(r)$ و g_ω در $n_g(r)$ حذف شده است و $\Delta n = i(g/2k_0)$ و $\Delta n_g = i(g_\omega/2k_0)$ قرار داده شده است. با استفاده از معادله (۲۱) برای تعیین بهره آستانه ، سازگاری خوبی با نتایج بخش قبل بدست آمده است .

خصوصاً اگر رفتار اختلالی ضریب مختلط به طور پیوسته در صفحه فعال VCSEL تغییر کند. در صورتی مفید واقع می شود که ابتدا موج عمودی (۹) با استفاده از ضریب ثابت در ناحیه فعال حل شود و سپس ، تغییر ضریب انجام شود . برای مثال ، توسط تغییر چگالی حامل با استفاده از معادله (۲۱) در نظر گرفته شود.

بدین طریق تلاشهای محاسباتی به طور قابل توجهی کاهش می یابد ، مخصوصاً اگر توزیع حاملها بطور سازگار با میدان نوری معین شود.

1977

First invention

1979

First lasing operation

1987

Low threshold operation with microcavity

1992

1. First continuous-wave (CW) emitting VCSEL in Europe, proton-implanted, 980 nm
2. 650 μ A threshold current at room temperature (RT)
3. 300 A/cm² threshold current density in broad-area devices

1993

1. Three-terminal devices with 8.2 nm continuous tuning range

1994

1. Two-dimensional 10×10 arrays, 1 Gbit/s data transmission per channel
2. 12 GHz modulation bandwidth
3. 30 MHz emission linewidth

1995

1. 10 Gbit/s data transmission over 500 m multimode fiber (MMF)
2. Selective oxidation technique implemented

1996

1. 180 mW cw output power from single device, 980 nm, transverse multimode
2. 20 MHz emission linewidth
3. 47 % conversion efficiency, 980 nm
4. 57 % conversion efficiency, 850 nm
5. 1 Gbit/s bias-free data transmission, 980 and 850 nm
6. Weak optical guiding concept for high single-mode output power

1997

1. 4.8 mW single-mode output power at 850 nm from weakly guided VCSEL
2. 350 mW from single device, 980 nm, multimode
3. 650 mW from 3×3 array, 980 nm, multimode
4. Introduction of diode cascade QW VCSEL concept
5. 2.5 Gbit/s bias-free data transmission over 500 m MMF, 850 nm
6. 2.5 Gbit/s via 1 m polymer optical fiber (POF) with 125 μm core diameter, 780 nm
7. 8×3 Gbit/s data transmission using a linear 1×8 VCSEL array, 850 nm
8. Two-dimensional 4×8 array for flip-chip CMOS integration

1998

1. Generation of squeezed states using extremely low noise VCSELs
2. CW operation of diode cascade VCSEL with 120 % DQE at 95 K
3. 1.0 Gbit/s bias-free data transmission via 4.3 km standard SMF at 820 nm
4. As before; 3.0 Gbit/s biased
5. 2.5 Gbit/s bias-free data transmission via 2.5 m POF with 125 μm core diameter
6. As before; 3.0 Gbit/s, 1 m POF

1999

1. First CW diode cascade (also "bipolar cascade") VCSEL at RT
2. 7 Gbit/s data transmission via 80 m graded-index POF (GI-POF)
3. 12.5 Gbit/s data transmission via 100 m multimode fiber and via 1 km standard SMF
4. 5 mW single-mode output power from long monolithic cavity VCSEL at 980 nm

5. 1 W CW output power from 19-elements VCSEL arrays; power density 0.89 kW/cm²
6. 9 Gbit/s data transmission via 100 m GI-POF
7. 2.5 Gbit/s data transmission with 1.13 μm InGaAs VCSEL via 10 km standard SMF

2000

1. 1.55 W CW output from 19-elements 2-D VCSEL arrays
2. 890 mW CW (10 W pulsed) from 320 μm active diameter VCSEL
3. 10 Gbit/s data transport over polymer waveguides integrated into PCBs
4. 4×10 Gbit/s coarse WDM transmission over 310 m MMF
5. 10 Gbit/s single-mode data transmission over 2.8 km MMF
6. Flip-chip integrable 850 nm VCSEL arrays using partially removed substrate
7. 5.5 mW single-mode output power from long monolithic cavity VCSELs
8. Linear VCSEL arrays for 10×10 Gbit/s aggregate data throughput
9. Commercialization of UIm's VCSEL technology: [U-L-M photonics](http://www.uim-photonics.com)

2001

1. 3-Stage diode cascade CW VCSEL with 130 % DQE at RT
2. 1 Gbit/s data rates from 4×8 VCSEL arrays integrated on 0.6 μm Si CMOS driver chip
3. 5.7 mW single-mode output power from VCSELs with self-aligned surface relief
4. Demonstration of a CW PCSEL: Photonic Crystal Surface-Emitting Laser

2002

1. 10 Gbit/s over 1 m polymer waveguide for optical backplane applications
2. Extended single-mode regime in low-resistance three-terminal dual-stage VCSELs
3. Modeling of the modal characteristics of PCSELs
4. Elliptically surface-etched single-mode VCSEL with enhanced polarization stability
5. Bistability behavior of bipolar cascade VCSELs observed and explained

2003

1. 10 Gbit/s operation of flip-chip integrated 8×8 VCSEL arrays
2. 10 Gbit/s data transmission over 100 m photonic crystal fiber (PCF)
3. Reduced thermal resistance of In-soldered 850 nm 2-D arrays
4. RT pulsed operation of electrically pumped integrated VCSEL source
5. Linearly polarized multimode VCSEL with a monolithically integrated surface grating

2004

1. 850 nm surface grating VCSEL with more than 20 mW output power at more than 11 dB OPSR
2. 9 Gbit/s data transmission with 850 nm SM VCSEL over 1 km of 9 μ m core SMF
3. Record-high integration densities of direct-mesa flip-bonded oxide-confined VCSELs
4. 10 Gbit/s data transport over polymer waveguides integrated into 10 cm-long PCB
5. 920 nm grating relief VCSEL with 4 mW SM output power at > 30 dB SMSR
6. Simultaneous mode and polarization control by an inverted grating relief
7. Thermal resistance reduction in 2-D 850 nm VCSEL arrays to only 0.9 K/mW for 10 μ m active diameter
8. Demonstration of VCSEL-based optical tweezing

2005

1. Grating VCSELs with 8 mW output power and more than 20 dB OPSR
2. 763 nm inverted grating relief VCSEL for oxygen sensing with 2.6 mW SM output power and 26 dB OPSR
3. Dynamic polarization stability of grating VCSELs shown for 10 Gbit/s modulation
4. Optimized positional design of surface gratings for high fabrication tolerance
5. 850 nm wavelength $(4 \times 4) \times 3$ VCSEL arrays with redundant pixel designs
6. Quasi error-free 10 Gbit/s data transmission over 500 m of butt-coupled 50 μ m MMF using redundant 2-D VCSEL arrays
7. 6.3 mW maximum SM output power from a top-emitting 860 nm VCSEL with an inverted surface relief
8. Multitweezers based on 2-D VCSEL arrays
9. Integration of focusing microlenses on top-emitting VCSEL surfaces
10. First demonstration of a compact optical trapping system using lensed VCSELs
11. 720 nm AlGaAs-based VCSELs with 0.6 mW peak output power

آینده VCSEL :

موضوعاتی که هنوز در مورد VCSEL جای کار دارد به قرار زیر است:

- افزایش توان در مد اصلی
- طول موجهای بلند تر برای کاربرد در حسگر ها
- طول موجهای کوتاهتر برای کاربرد در نمایشگر ها
- آرایه VCSEL برای پردازشگر های سیگنال نوری
- پردازش تصویر

1. Vertical- Cavity Surface- Emitting Laser Devices "H.Li and K.Iga" Springer
2. Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers: Moving from Research to Manufacturing" KENT D. CHOQUETTE, AND HONG Q. HOU" IEEE, VOL. 85, NO. 11, NOVEMBER 1997
3. Recent Advances of VCSEL Photonics "Fumio Koyama" JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 24, NO. 12, DECEMBER 2006
4. Comparison of Exactness of Scalar and Vectorial Optical Methods Used to Model aVCSEL Operation "Tomasz Czyszanowski and Włodzimierz Nakwask" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 43, NO. 5, MAY 2007
5. The Effective Frequency Method in the Analysis of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser "Hans Wenzel and Hans-Jürgen Wunsche," IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 33, NO. 7, JULY 1997
6. Comprehensive numerical model for cw vertical-cavity surface-emitting lasers "G. R. Hadley, K. L. Lear, M. E. Warren, and K. D. Choqueue" *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices III*, SPIE, 1995, vol. 2399, pp. 336–347