استفاده از موجبر پهن با پروفایل ضریب شکست با تغییرات تدریجی برای بهبود مشخصات الکترواپتیکی لیزر دیود

سید پیمان عباسی، حامد ورزکاری و محمد حسین مهدیه

دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران

چکیده – ضخامت لایه و پروفایل ضریب شکست موجبر لیزر نیم‌رسانا تعیین کننده مشخصات الکترواپتیکی در لیزرهای نیم‌رسانا است. در این مقاله نشان داده شده است که با بکارگیری موجبری با ضریب شکست با تغییرات تدریجی و افزایش ضخامت لایه‌ی موجبر به جای ساختار پله‌ای متداول می‌توان مشخصات الکترواپتیکی همچون واگرایی در محور تند و جریان آستانه را بدون کاهش بازدهی بهبود بخشید. همچنین با اضافه کردن مقدار ناخالصی مناسب در لایه موجبر بخش n ، بدون اضافه شدن موثر اتلاف حاملهای آزاد، می توان از کاهش مشخصه ضریب بازده توان به جریان جلوگیری کرد.

کلید واژه- ضریب شکست پله‌ای، ضریب شکست تدریجی، لیزر دیود، موجبر.

Laser Diode Electro-optics Characteristics Improvement by Graded Index Refractive Index Profile Broadened Waveguide

Seyed Peyman Abbasi, Hamed Varzkari, Mohammad Hossein Mahdieh

Physics Faculty Iranian University Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran

Abstract- Thickness and refractive index of waveguide layer determine the electro-optic characteristics in semiconductor lasers. In this research the stepped refractive index profile was replaced by suitable broadened graded refractive index in waveguide layer. The results show such design can significantly improve the vertical divergence and threshold current for laser operating in constant efficiency. In order to preventing of slop efficiency decreasing in broadened waveguide, we proposed the optimum dopant in n-section of waveguide without extra effective free carrier loss.

Keywords: Diode Laser, Graded refractive Index, Stepped refractive Index, Waveguide.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

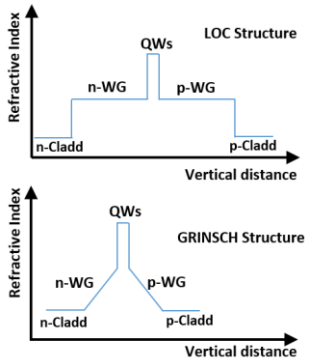
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

لیزرهای نیم‌رسانا دارای پرتوئی استیگمات با واگرایی بالا و کیفیت پایینتر نسبت به پرتو لیزرهای دیگر هستند. امروزه بهبود کیفیت پرتو در لیزرهای نیم‌رسانا به هدف تزویج به فیبر نوری باعث گسترش کاربرد مستقیم پرتو لیزردیودها شده است[۱]. بهبود کیفیت پرتو و کاهش واگرایی لیزرهای نیم‌رسانا اثرات منفی را در توان و مشخصات الکترواپتیکی همانند کاهش توان اپتیکی و افزایش جریان آستانه لیزرها ایجاد می‌کند که محققان را بر آن داشته تا این اثرات را کاهش دهند[۲].

امروزه در اکثر لیزرهای نیم‌رسانا، از ساختار کاواک اپتیکی بزرگ (LOC) یا ساختار موجبر با ضریب شکست تدریجی (GRINSCH) جهت طراحی لایه های موجبر استفاده می شود[۳].

در ساختار کاواک اپتیکی بزرگ از تغییرات ضریب شکست پله ای موجبر نسبت به غلاف استفاده می‌شود و ضخامت لایه موجبر بزرگتر از موجبرهای مرسوم است(شکل۱). با افزایش ضخامت لایه های محصورکننده ساختار لیزر، واگرایی عمودی میدان دور آن کاهش می یابد که با افزایش جزئی جریان آستانه و کاهش کم بازده همراه است. این ساختارها عملکرد توان بالای بسیار خوبی به همراه ویژگی های پرتو بهبود یافته در مقایسه با لیزرهای دارای موجبر با پهنای معمولی را نشان میدهند. [۳و۴].



شکل ۱: پروفایل ضریب شکست در دو ساختار با تغییرات پله‌ای (بالا) و تغییرات تدریجی (پایین) ضریب شکست در بخش موجبر. در شکل WG موجبر، Cladd غلاف و QW چاه کوانتمی است.

در ساختار موجبر با ضریب شکست تدریجی، تغییرات ضریب شکست موجبر، بصورت غیر پله‌ای (مثلاً خطی) از مقدار بیشینه‌ای به ضریب شکست غلاف می‌رسد که این مقدار بیشینه با توجه به چاه کوانتمی و مقدار محصور سازی تعیین می‌گردد(شکل۱). مبانی نظری نشان می‌دهد که برای ضخامت ناحیهٔ فعال برابر، جریان آستانه در چنین ساختاری از مقدار مورد انتظار در لیزرهای مرسوم (یعنی از نوعی که در آن گاف‌نوار با رفتار پله‌ای است) می‌تواند کمتر باشد که برای آن تاکنون دو دلیل مطرح است. اول اینکه شدت میدان الکتریکی القایی همواره با گرادیان گاف‌نوار متناسب است. این شرایط بشدت بازدهی را افزایش می‌دهد زیرا که چاه پتانسیل نازک (ناحیهٔ فعال) حامل‌ها را تسخیر می‌کند. ثانیاً موجبر با نمایهٔ ضریب‌شکست خمیده موجهای الکترومغناطیسی را مؤثرتر هدایت می‌کند. [۵و۳].

مقدار گاف انرژی و تغییرات ضریب شکست $Al_xGa_{1-x}As$ بر حسب مقدار مولار آلومینیوم برای مقادیر کمتر از ۰/۵ برابر است با[۳]:

$$E_g = 1.42 + 1.23x + 0.2x^2 (\text{eV}) \quad (۱)$$

$$n = 3.73 - 0.8x \quad (۲)$$

لذا با انتخاب مقادیر مختلف آلومینیوم در $Al_xGa_{1-x}As$ می‌توان لایه های غلاف و موجبر را در لیزر نیم رسانا ایجاد نمود. در اکثر لیزرهای نیم‌رسانا این تغییر - پله‌ای و یا بصورت تدریجی ایجاد می گردد تا به ترتیب ساختارهای موجبر با ضریب شکست پله‌ای و موجبر با ضریب شکست تدریجی ایجاد گردد. در تحقیق حاضر ساختارهای مختلفی از موجبر با ضریب شکست تدریجی به جای ساختار مرسوم پله‌ای با ساختار ذکر شده در جدول ۱ جایگزین شده است که در برخی از آنها مشخصات الکترواپتیکی بهبود قابل توجهی یافته اما مشخصه واگرایی محور تند افزایش یافته است. لذا با تغییر در پروفایل ناخالصی بخش n موجبر، ساختاری که در تمامی پارامترها نسبت به ساختار پله‌ای (با پهنای موجبر ۱ میکرون) عملکرد بهتری دارد بعنوان ساختار بهینه معرفی می‌شود.

۲- ساختار لیزر

شبیه سازی با نرم افزار RSoft انجام گرفته است[۷]. لیزر در نظر گرفته شده با ابعاد هندسی: طول کاواک ۱۰۰۰ میکرون، عرض تراشه ۵۰۰ میکرون، ضخامت تراشه ۱۲۰ میکرون و عرض نوار تزریق جریان ۱۰۰ میکرون، جهت خروجی طول

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

موجی ۸۰۸ نانومتر با طراحی لایه های رشد داده شده مطابق جدول ۱ است. ابعاد موجبر این لیزر همانند لیزرهای مرسوم، برابر ۱ میکرون است.

جدول ۱: لایه‌های رشد داده شده لیزر نیم‌رسانا با موجبر پله‌ای

Cap layer: p-GaAs	100nm
p-cladding layer: p-$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	1000nm
p-waveguide: p-$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$	500nm
Active layer QW: $Al_{0.07}Ga_{0.93}As$	10nm
n-waveguide: n-$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$	500nm
n-cladding layer: n-$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	1000nm
Substrate: GaAs	

۲-۱ بکارگیری ساختار ضریب شکست تدریجی

در مقابل ساختارهای پله‌ای متداول می توان از ساختارهایی با تغییرات ضریب شکست تدریجی استفاده نمود. در چنین ساختاری با تغییر مقدار آلومینیوم از ۰/۳ تا ۰/۵ در ضخامتهای مختلف موجبر از ۱ تا ۳ میکرون استفاده شد. در هر شبیه سازی پارامترهای جریان آستانه، ضریب محصور سازی اپتیکی، جریان لازم برای دستیابی به توان ۲۰۰۰ میلی وات، واگرایی در محور تند، بازدهی، مقاومت سری و ضریب بازده توان به جریان اندازه گیری شد که نتایج آن برای ساختار پله‌ای و شش ساختار تدریجی در جدول شماره ۲ خلاصه شده است. همانگونه که از جدول ۲ پیداست با افزایش پهنای موجبر در ساختار تدریجی، ضریب محصور سازی کاهش می‌یابد که مورد انتظار است اما حتی در ساختاری با پهنای سه برابر پهنای موجبر پله‌ای این مقدار بیشتر است و می‌توان از پهن شدن میدان نزدیک پرتو بدون نگرانی از کاهش ضریب محصورسازی و افزایش جریان آستانه در راستای کاهش واگرایی بهره برد. از طرفی در ضخامتهای بالای موجبر، رسیدن به توان حدود ۲۰۰۰ میلی وات در جریان‌های بالاتری امکانپذیر می‌شود که تا حدود ۱۰ درصد بیش از مقدار جریان برای ساختار پله‌ای متداول است. لذا با توجه به تمامی پارامترهای نشان داده شده ساختار شماره ۵ با پهنای موجبر ۲/۵ میکرون در تمامی پارامترها از ساختار پله‌ای بجز ضریب افزایش توان به جریان دارای عملکرد بهتری است. در ساختار مذکور جریان آستانه و واگرایی محور تند به ترتیب ۱۲ و ۷ درصد نسبت به ساختار پله‌ای کاهش یافته است. همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود ضریب افزایش توان به جریان در ساختار پله‌ای نسبت به ساختار بهینه انتخابی عدد بهتری را نشان می‌دهد که این هم بدلیل ولتاژ بالا (بدلیل پهنای موجبر) حادث شده است. برای کاهش اثرات منفی و افزایش ضریب افزایش توان به جریان در ساختار موجبر با ضریب شکست تدریجی پیشنهاد شده، از اضافه کردن دوپانت به موجبر استفاده می‌شود.

۲-۲ بکارگیری دوپانت در موجبر

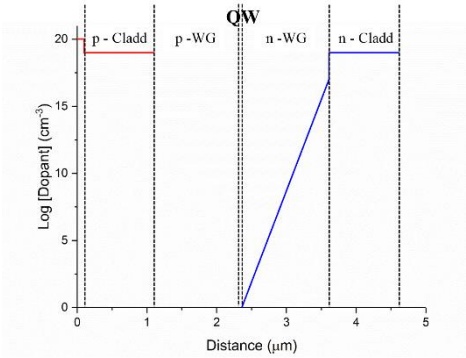
حضور حاملها در موجبرهای پهن باعث کاهش مقاومت و افزایش ضریب افزایش توان به جریان شده، از طرفی باعث افزایش اتلاف حاملها نیز می‌شود[۸]. تعادل بین این دو موضوع نیازمند بکارگیری مقدار بهینه‌ای از دوپانت است. مقدار اتلاف در موجبر به مقدار غلظت الکترون و حفره آزاد، سطح مقطع جذب الکترون و سطح مقطع جذب حفره در موجبر، بستگی دارد[۸]. بدلیل بزرگتر بودن اتلاف حفره از اتلاف الکترون تنها از دوپانت دهنده در بخش n موجبر به مقدار متغیر از صفر تا 1e+17 cm-3 استفاده شد. در شکل۲ لگاریتم پروفایل دوپانت ماده نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات لیزر با موجبر با ضریب شکست پله ای و با ضریب شکست تدریجی با عرض موجبر مختلف

	STEP structure	GRINSCH Structure					
Parameter	**Struc1**	**Struc2**	**Struc3**	**Struc4**	**Struc5**	**Struc6**	**Struc7**
WG Thickness	1	1	2	2.3	2.5	2.7	3
WG Al-Content	0.4	0.3-0.5 (linear)					
Threshold Current (mA)	569	390	439	486	499	508	523
Confinement Factor (%)	1.6	2.38	2.04	1.81	1.77	1.74	1.69
Operation Current (mA) for 2000mW	2385	2015	2205	2305	2365	2430	2525
Divergence (FWHM) Deg.	41.5°	48.9	42.4	39.7	38.6	37.6	36.3
Efficiency (%) in 2000mW	49	60	53	51	49	48	46
Series Resistance(mW)	23.8	23.4	23.9	23.6	23.4	23.3	23.0
Slope Efficiency(W/A)	1.09	1.23	1.04	1.02	0.95	0.91	0.86

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]



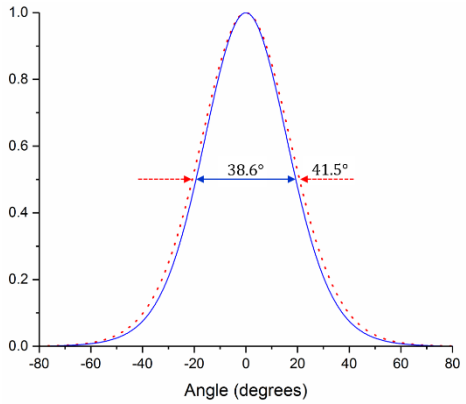
شکل۲: تغییرات لگاریتمی پروفایل عرضی دوپانت در لایه‌های لیزر دیود (خط آبی دوپانت دهنده و خط قرمز دوپانت پذیرنده است)

۳- نتایج

نتایج شبیه سازی ساختار دارای دوپانت در بخش موجبر (ساختار شماره ۸) در جدول ۳ با ساختار بدون دوپانت و ساختار پله‌ای مقایسه شده است.

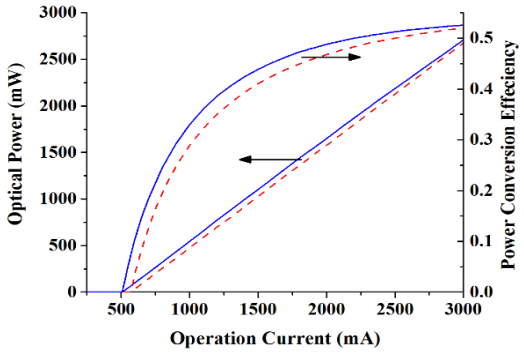
جدول ۳: نتایج مربوط به ساختار با موجبر تدریجی دارای دوپانت در مقابل ساختار با موجبر تدریجی بدون دوپانت و ساختار موجبر پله‌ای

	STEP	GRINSCH	
Parameter	Struc1	Struc5	Struc8
WG Dopant Type	---	---	Donor
WG Dopant	---	---	0-1e+17
WG Thickness	1	2.5	2.5
WG Al-Content	0.4	0.3-0.5 (Linear)	
Threshold Current (mA)	569	499	507
Confinement Factor (%)	1.6	1.77	1.77
Operation Current (mA) for 2000mW	2385	2365	2325
Divergence (FWHM)	41.5°	38.6°	38.6°
Efficiency (2W)	49%	49%	51%
Series Resistance(mΩ)	23.8	23.4	20.9
Slope Efficiency(W/A)	1.09	0.95	1.04



شکل۳: زاویه واگرایی محور تند پرتو در ساختارهای با ضریب شکست تدریجی با دوپانت (خط ممتد آبی رنگ) و لیزر پله‌ای (نقاط قرمز رنگ)

همانگونه که مشاهده می‌شود ضریب افزایش توان به جریان در ساختار موجبر با ضریب شکست تدریجی با دوپانت بهبود قابل توجهی یافته است. همچنین بازده نیز افزایش یافته است. شکل۳ نشان دهنده تغییرات شدت میدان دور (زاویه واگرایی محور تند) در دو ساختار با تغییرات تدریجی دارای ناخالصی و تغییرات پله ای است. در شکل ۴ مشخصه جریان-توان و جریان-بازده نیز نشان داده شده است.



شکل ۴: مشخصات الکترواپتیکی لیزر شبیه سازی با ساختار موجبر با ضریب شکست تدریجی با دوپانت (خطوط ممتد آبی رنگ) و لیزر پله‌ای (خطوط منقطع قرمز رنگ)

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق چاه کوانتمی $Al_{0.07}Ga_{0.93}As$ با عرض ۱۰nm برای گسیل پرتو ۸۰۸ نانومتر از لیزر نیم‌رسانا با موجبر پهن بهینه شد و نشان داده شد که ساختار GRINSCH با پهنای ۲/۵ میکرون و دوپانت متغیر از صفر تا 1e+17 برای بخش n موجبر دارای بهینه ترین عملکرد نسبت به ساختار پله‌ای متداول است. در این لیزر می‌توان با توجه به محدودیت آستانه تخریب ماده AlGaAs، توان ۲۴۵۰ mW را بدست آورد.

مراجع

[1] R. Deihl, *High Power Diode Lasers, Fundamentals, Technology, Applications*, 1th ed, Springer-Verlag Press, 2001.
[2] A. Malag, E. Dabrowska, M. Teodorczyk, G. Sobczak, A. Kozlowska and J. Kalbarczyk, "Asymmetric Heterostructure with Reduced Distance from Active Region to Heatsink for 810-nm Range High-Power Laser Diodes", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 48, No.4, pp. 465-471, 2012.
[3] B. Mroziewicz, M. Bugajski and W. Nakwaski, *Physics of Semiconductor Lasers*, North Holland Publication 1991.
[4] A. Pietrzak, P. Crump, "Combination of Low-Index Quantum Barrier and Super Large Optical Cavity Designs for Ultranarrow Vertical Far-Fields from High-Power Broad-Area Laser", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 17, NO. 6, 2011.
[5] S. R. Chinn, P. S. Zory, A. R. Reissnger, "A Model for GRIN-SCH-SQW Diode Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol. 21 NO. 2, 1988.
[6] S. Adachi, *Handbook on Physical Properties of Semiconductors*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 2, 2004.
[7] Synopsys, Inc., Optical Solutions Group, [RSoft LaserMOD v2013.12 User Guide], optics.synopsys.com, 2013.
[8] Z. wang, T. Li, G. Yang, Y. Song, "High Power High efficiency continuous-wave 808nm laser diode arrays", optics and laser technology Vol.97 pp.297-301, 2017.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]