

SUPERMODI IN LASER AD EMISSIONE VERTICALE CON ELETTRODO A GRIGLIA

P. Debernardi¹, G.P. Bava¹ e F. Monti di Sopra²

¹IRITI (CNR), Dip. di Elettronica, Corso Duca degli Abruzzi 24, Torino
pierluigi@polito.it

²Avalon Photonics Ltd., Badenerstrasse 569, 8048 Zurich, Switzerland

Abstract

We present a detailed study of oxide-confined, vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL's) where the reflectivity of the top mirror has been patterned by means of a metal grid, which at the same time acts also as an electrode. Owing to their features, these kind of devices are commonly referred as phase-coupled VCSEL arrays. The analysis is based on a joint experimental and theoretical effort: the former is devoted to a complete characterization of the emission properties, while the latter is based on a comprehensive fully vectorial model for the structure eigenmodes with the details of the complex structures. The good matching between theory and experiment opens new perspectives for optimized devices, where the typical four lobe far-field emission is converted in a narrow central lobe.

INTRODUZIONE

I laser ad emissione verticale (VCSEL) convenzionali sono composti da una cavità definita da due specchi multistrato (di Bragg). In questo lavoro si analizzano gli effetti sui modi del dispositivo quando lo specchio di uscita è ricoperto da una griglia metallica, come mostrato in Fig.1, che agisce sia da elettrodo sia da elemento che modifica le caratteristiche di emissione. Questo tipo di laser è stato sviluppato recentemente [1,2] con lo scopo di raggiungere livelli di potenza più alti rispetto ai VCSEL tradizionali, mantenendo tuttavia caratteristiche di emissione monomodale. La griglia metallica, dello spessore di circa 100 nm, è costituita da strisce larghe 1 micron che definiscono dei fori quadrati di 4 micron di lato. Si sono così realizzate matrici di $n \times n$ fori con n da 4 a 10. Nel presente lavoro si confronteranno i risultati sperimentali con quelli ottenuti da una simulazione numerica del dispositivo. Il modello utilizzato è basato sulla teoria dell'accoppiamento modale, in cui tutti gli elementi della struttura che definiscono il confinamento laterale del campo sono introdotti come perturbazioni di una costante dielettrica di riferimento, scelta essere quella della cavità. Il campo elettromagnetico viene sviluppato nella base completa e continua dei modi TE e TM cilindrici di tale mezzo imperturbato. L'effetto del risonatore viene ricondotto ad un problema agli autovalori; questi sono legati alle frequenze e guadagni modali, mentre gli autovettori permettono di calcolare le distribuzioni di campo [3,4].

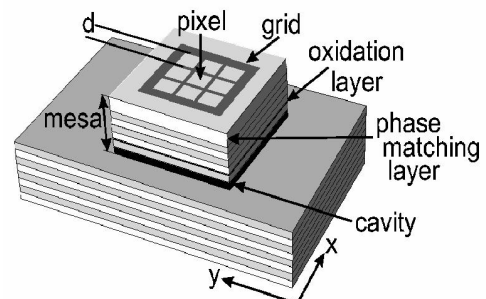


Fig. 1: Schema di VCSEL con elettrodo a griglia sulla sezione di uscita.

CONFRONTO FRA RISULTATI NUMERICI E SPERIMENTALI

La struttura di Fig. 1 è progettata per lavorare a 960 nm. La cavità in $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ contiene una regione attiva di 3 quantum well in InGaAs; dal lato di uscita, drogato p , vi è uno strato $\lambda/2$ che ne contiene uno di 25 nm di AlAs, il quale viene in seguito parzialmente ossidato in modo da ottenere una apertura quadrata che serve a confinare sia la corrente che il campo elettromagnetico. Gli specchi sono costituiti rispettivamente da 19 paia (lato p) e 30 paia (lato n) di strati $\lambda/4$ in GaAs/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. Fra elettrodo e specchio di uscita viene interposto uno strato in GaAs il cui spessore (circa 180 nm) viene scelto in modo da massimizzare il contrasto nella riflettività fra le aree ricoperte dalla griglia metallica e le altre.

In Fig. 2 si mostra il guadagno e la lunghezza d'onda modale per una struttura con $n=4$, cui corrisponde una regione attiva e una apertura nell'ossido quadrate di 20 μm di lato; tali quantità vengono riportate per differenti spessori dell'elettrodo a griglia. In assenza di elettrodo (punti) il guadagno è sensibilmente costante, come conseguenza della grossa sezione del dispositivo. L'introduzione della griglia metallica aumenta le perdite, e queste sono fortemente dipendenti dal profilo del modo; esse risultano minime per i modi che hanno zeri in corrispondenza delle strisce metalliche.

Alcuni esempi di profili modali sono presentati in Fig. 3, per il modo a guadagno più basso (laserante) e più alto, sia con che senza elettrodo. Si può facilmente notare che il modo laserante viene poco influenzato dalla presenza della griglia, mentre l'altro risulta fortemente deformato con conseguente aumento delle perdite.

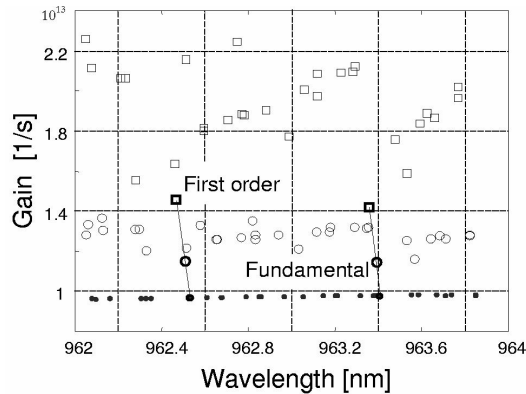


Fig. 2: Guadagni in funzione della lunghezza d'onda per la struttura 4x4 al variare dello spessore della griglia: punti, 0, cerchi 10 nm, quadrati 100 nm.

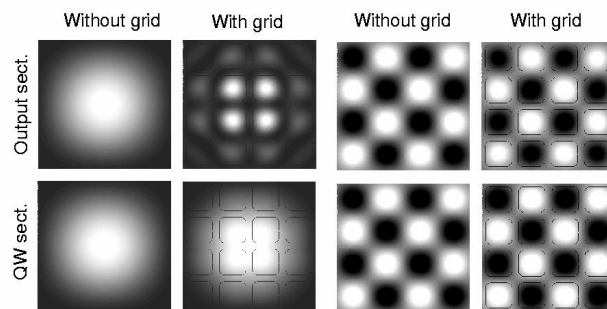


Fig. 3: Profili di ampiezza del modo laserante (a destra) e del modo TEM_{00} (sinistra); per l'ultimo il nero rappresenta lo zero, mentre per i profili di destra il nero (bianco) rappresenta ampiezze di segno negativo (positivo).

Altre caratteristiche interessanti del modo laserante riguardano il suo stato di polarizzazione, che risulta non omogenea tra i diversi pixel. Questo fatto è stato messo in evidenza da rilievi sperimentali basati su osservazioni di polarizzazione e spettro e registrazione di immagini tramite una camera CCD. L'emissione del VCSEL viene fatta passare attraverso un filtro di polarizzazione costituito da una lamina $\lambda/4$ ed una $\lambda/2$ in combinazione con un isolatore ottico. Tale configurazione permette di misurare l'ellitticità χ e l'orientazione ϕ della luce emessa, variando gli angoli χ_0 e ϕ_0 rispettivamente delle lamine $\lambda/4$ e $\lambda/2$. Successivamente la luce viene elaborata

mediante un filtro Fabry-Perot ed inviata ad un fotodiodo oppure ad una camera CCD. Il primo tipo di rivelatore permette di misurare spettri risolti in polarizzazione; mediante la camera si possono registrare tutte le possibili combinazioni di polarizzazioni e spettri in campo vicino e lontano.

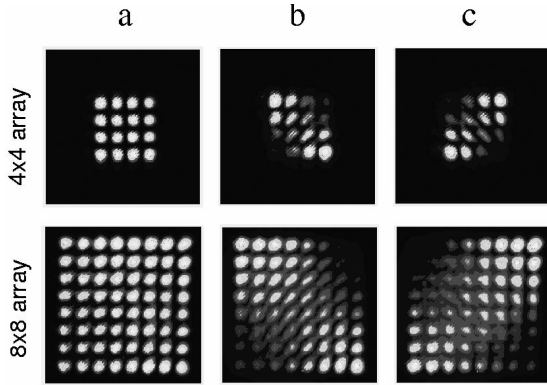


Fig. 4: Immagini di campo vicino risolte spettralmente ed in polarizzazione. Per $n=4$ (8) gli angoli χ_0, ϕ_0 sono posti : **a:** $90^\circ, 0^\circ$ ($88^\circ, 0^\circ$), **b:** $0^\circ, -4^\circ$ ($-2^\circ, -10^\circ$), **c:** $0^\circ, 4^\circ$ ($-2^\circ, 10^\circ$).

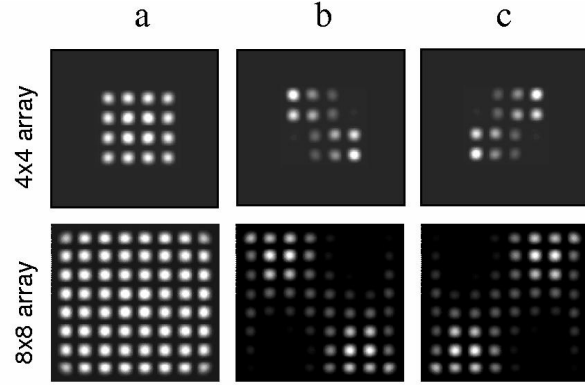


Fig. 5: Distribuzioni di campo vicino calcolate per il modo laserante. Per $n=4$ (8) gli angoli χ_0, ϕ_0 sono posti a: **a:** $90^\circ, 0^\circ$ ($90^\circ, 0^\circ$), **b:** $0^\circ, -2^\circ$ ($0^\circ, -4^\circ$), **c:** $0^\circ, 2^\circ$ ($0^\circ, 4^\circ$).

Un primo rilievo spettrale ha mostrato che non è possibile, con la rotazione del filtro di polarizzazione, eliminare completamente la polarizzazione dominante; per $n=4$ si è misurato una soppressione massima di 200, mentre di solo 80 per $n=8$. Si consideri che in un VCSEL semplice tale soppressione raggiunge facilmente valori di 40 dB.

Per comprendere la ragione di tale fenomeno si è proceduto ad un'analisi mediante camera CCD del segnale in campo vicino al variare del filtro di polarizzazione; il modo ortogonale non laserante, che potrebbe dare errori nella misura, viene eliminato dal filtro FP. Il risultato di tale misura è mostrato in Fig. 4 per due array di diversa dimensione. Dapprima (Fig. 4a) si orienta il filtro in modo da massimizzare il segnale in uscita (che corrisponde ad una polarizzazione verticale). Quindi si ruota di 90° la lamina $\lambda/2$, nel tentativo di eliminare completamente l'uscita. Poichè questo non accade si agisce sulla lamina $\lambda/4$ e si ottengono i risultati di Fig. 4b,c che mostrano la non omogeneità della polarizzazione fra i vari pixel. Tale distribuzione ha una ben fissata simmetria e quindi non può essere attribuita ad effetti casuali; possibili cause termiche sono state escluse da misure in condizione impulsata.

La spiegazione dei precedenti risultati ha origine nella natura vettoriale dei modi del dispositivo; anche se i modi hanno tipicamente una componente trasversale dominante, il fatto che le altre componenti non siano trascurabili in questa struttura ha come conseguenza la disomogeneità della polarizzazione. Si può osservare come i risultati ottenuti dalla simulazione numerica riportati in Fig. 5 ben riproducono il risultato sperimentale di Fig. 4.

Il campo lontano della struttura è presentato nella Fig.6; in *a* è riportato il risultato sperimentale ed in *b* quello calcolato. Anche in questo caso l'accordo è buono, come anche si vede da Fig.6c, in cui si riportano i risultati relativi alla larghezza del lobo di irradiazione al variare del parametro n . L'andamento è inversamente proporzionale ad n . La caratteristica emissione su quattro lobi è dovuta alla distribuzione di campo vicino, che presenta variazioni di fase di 180° tra pixel adiacenti (vedi Fig. 3).

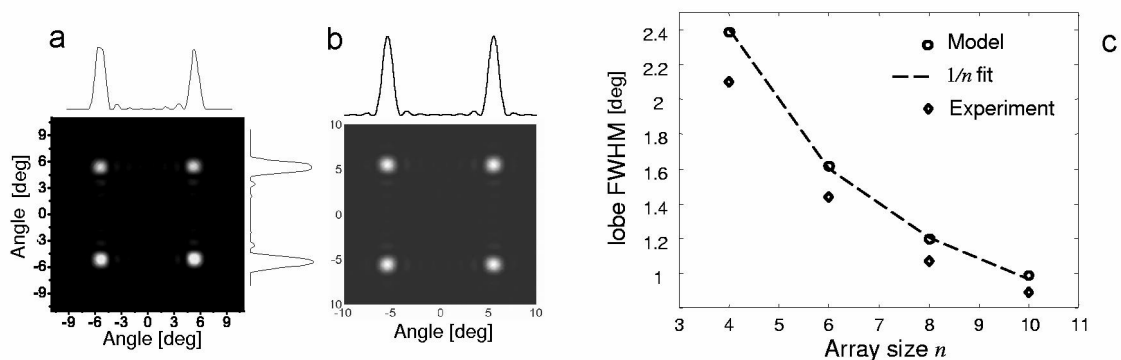


Fig. 6: Diagramma di irradiazione misurato (a) e calcolato (b) per la struttura 8x8; in c andamento della larghezza dei lobi in funzione della grandezza dell'array.

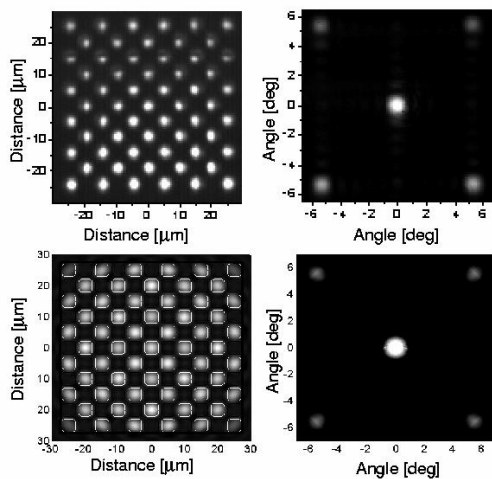


Fig. 7: Campo vicino(sinistra) e lontano (destra) per un array 11x11 modificato come spiegato nel testo. Risultato sperimentale (numerico) in alto (basso).

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito del Progetto TMR VISTA. Fabrice Monti di Sopra ringrazia M. Moser, R. Hovel, H.-P. Gauggel, A. Vonlanthen per l'assistenza tecnica e M. van Exter e M. Willemsen per il rilevante apporto dato nelle misure di polarizzazione.

RIFERIMENTI

- [1] F. Monti di Sopra, M. Brunner, H.-P. Gauggel, H.P. Zappe, M. Moser, R. Hovel and E. Kapon, "Continuous-wave operation of phase-coupled VCSEL arrays," Appl. Phys. Lett. 77, pp. 2283, 2000.
- [2] F. Monti di Sopra, M. Moser, M. Brunner, M. B. Willemsen, M. P. van Exter, and E. Kapon: "Polarization Stability of Phase-Locked Arrays of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," IEEE Phot. Tech. Lett. 13, 1149, 2001
- [3] G.P.Bava, P.Debernardi and L.Fratta: "Analisi elettromagnetica di VCSEL con struttura complessa"; RINEM 2000, Como, September 2000
- [4] P.Debernardi, G.P.Bava, C. Degen, I. Fischer and W. Elsaesser, "Influence of anisotropies on transverse modes in oxide-confined VCSEL's," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 38, pp. 73-84, 2002