

PARTICOLARITÀ SULL' UTILIZZO DI UN MODO DI ORDINE SUPERIORE PER LA GENERAZIONE DI SECONDA ARMONICA CON LA TECNICA DEL QUASI PHASE MATCHING

Giovanni TARTARINI, Paolo BASSI

Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica
Università di Bologna

Ilaria CRISTIANI, Carlo LIBERALE, Vittorio DEGIORGIO

Istituto Nazionale per la Fisica della Materia e Dipartimento di Elettronica
Università di Pavia

Abstract

A detailed modal analysis is performed to study the characteristics of Periodically Poled Lithium Niobate (PPLN) waveguides obtained with the Annealed Proton Exchange (APE) technique. The approach determines the refractive index profile of the waveguides through the solution of a two-dimensional (2D) nonlinear diffusion equation and then performs the modal analysis with a 2D mode solver based on the Finite Element Method (FEM). The model has been validated through a comparison of computed results with experimentally observed ones, and it has been subsequently applied to study the efficiency of the Second Harmonic Generation (SHG) process with the Quasi Phase Matching (QPM) technique in the $1.55\text{ }\mu\text{m}$ band when a non-fundamental SH mode is used. The obtained results give important informations for the design of PPLN waveguides for QPM.

INTRODUZIONE

L'utilizzo dell'accoppiamento del modo di pompa con un modo diverso dal modo fondamentale per realizzare il processo di generazione di seconda armonica (SHG) può presentare diversi vantaggi, come riportato in [1, 2, 3]. In questi lavori ci si è riferiti a guide costituite da diversi materiali, e sono state effettuate analisi sia di tipo sperimentale, sia di tipo teorico, utilizzando per queste ultime programmi di simulazione basati sul metodo dell'Indice Efficace (EIM) per determinare le caratteristiche dei modi delle guide ottiche considerate.

Nel presente lavoro viene effettuato uno studio dell'utilizzo di un modo superiore per SHG in guide APE PPLN. Rispetto a quanto sopra citato, però, dopo aver determinato il profilo dell'indice di rifrazione delle guide APE, lo studio delle caratteristiche modali delle stesse è stato effettuato utilizzando il Metodo degli Elementi Finiti (FEM), che fornisce risultati più rigorosi dell'EIM. Il FEM è stato già utilizzato per lo studio di guide ottiche realizzate per SHG [4,5], ma sempre limitatamente al caso in cui il modo di seconda armonica eccitato con la tecnica QPM fosse il modo fondamentale.

Nel lavoro si mostrerà che solo attraverso l'utilizzo del solutore 2D FEM è possibile mettere in evidenza alcune importanti proprietà elettromagnetiche delle guide APE PPLN da tenere in considerazione quando si voglia realizzare un processo di SHG efficiente sfruttando un modo di ordine superiore.

Il lavoro è organizzato nella maniera seguente. Inizialmente verrà presentato il metodo utilizzato per calcolare le caratteristiche ottiche di guide APE PPLN a partire dai parametri di fabbricazione delle guide stesse. Verrà poi dimostrata la validità del metodo attraverso il confronto di valori calcolati con valori misurati sperimentalmente della lunghezza d'onda di QPM con riferimento al modo fondamentale di seconda armonica. Una volta dimostrata la validità, il metodo verrà utilizzato per studiare le caratteristiche del processo SHG qualora si intenda utilizzare un modo non fondamentale di seconda armonica, e si illustreranno i risultati relativi. Verranno infine tratte alcune conclusioni.

MODELLO TEORICO

Per semplicità di trattazione, e per poter effettuare confronti con misure effettuate su guide reali, studieremo il comportamento elettromagnetico di guide PPLN APE realizzate in un cristallo Z -cut al variare della sola W , larghezza della maschera utilizzata per realizzare la guida a canale. Verranno quindi tenuti fissi gli altri parametri coinvolti nel processo di fabbricazione, vale a dire T_{PE} , t_{PE} , T_{AN} , t_{AN} , temperature e durate dei processi di scambio protonico e di annealing, rispettivamente.

Una volta assegnati W , T_{PE} , t_{PE} , T_{AN} , t_{AN} , viene calcolato l'andamento della concentrazione dei protoni all'interno della guida risolvendo un'equazione della diffusione bidimensionale non lineare, e da qui viene determinato l'andamento del tensore di permittività $\bar{\epsilon}(x, z, \lambda)$, secondo quanto proposto in [6]. A questo punto, tramite un solutore modale FEM 2D [7] è possibile determinare le caratteristiche dei modi di propagazione della struttura considerata.

Come primo indicatore per valutare l'efficienza del processo di conversione non lineare alla frequenza di pompa λ_p si è considerata una quantità ad essa proporzionale, vale a dire l'integrale di ricoprimento $I_{mn}(\lambda_p, W)$ fra il quadrato della componente principale $e_{p00}(x, z)$ del modo di pompa e la componente principale $e_{SH\ mn}(x, z)$ del modo SH di ordine mn :

$$I_{mn}(\lambda_p, W) = \int_{S_y} e_{p00}^2(x, z) e_{SH\ mn}(x, z) dx dz \quad (1)$$

Un secondo riferimento si ottiene invece a partire dalla relazione caratteristica del processo QPM:

$$n_{eff\ mn}(\lambda_p/2, W) - n_{eff\ 00}(\lambda_p, W, 00) = \frac{\lambda_p}{2\Lambda} \quad (2)$$

e consiste nell'andamento di $\lambda_p(\Lambda, W)|_{mn}$. Questa funzione rappresenta la lunghezza d'onda per la quale ha luogo il QPM con il modo SH di ordine mn al variare del periodo di inversione Λ dei domini ferroelettrici, e al variare di W . La qualità del processo di conversione è legata infatti anche al comportamento di questa funzione, che deve presentare un comportamento il più possibile piatto rispetto a piccole variazioni di Λ o di W nell'intorno del punto di lavoro desiderato.

Questo approccio numerico è già stato da noi proposto in [8], dove, con riferimento al modo SH fondamentale, è stata verificata la sua validità mostrando un accordo molto buono di andamenti teorici e corrispondenti risultati sperimentali. Nel seguito verranno invece mostrate applicazioni che si riferiscono all'accoppiamento con un modo SH di ordine superiore.

APPLICAZIONI

Indichiamo con Z e X rispettivamente gli assi verticale e orizzontale della sezione trasversa delle guide considerate. Denomineremo i modi come TM dato che, pur essendo ibridi, essi presentano le componenti E_z e H_x largamente dominanti. Si desidera avere QPM per $\lambda_p = 1550\text{ nm}$. I calcoli sono stati effettuati usando i parametri di fabbricazione considerati nel lavoro sperimentale descritto in [8]: $T_{PE} = 200\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{AN} = 340\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{PE} = 23\text{ min.}$ e $t_{AN} = 6\text{ h.}$ Il valore di W varia nell'intervallo $[4.5\text{ }\mu\text{m}, 10.5\text{ }\mu\text{m}]$.

A $\lambda \simeq 775\text{ nm}$ nelle guide considerate sono guidati i modi del tipo TM_{m0} ($m \geq 0$) (cioè i modi TM_{00} TM_{10} TM_{20} ...) che presentano periodicità in direzione orizzontale X ed il modo TM_{01} che presenta invece due lobi lungo la direzione verticale Z . Il confronto che ci accingiamo ad effettuare riguarda l'efficienza che si ha utilizzando come modo di pompa il modo TM_{00} , e come modi SH il TM_{00} oppure il TM_{01} .

Nelle Fig. 1 (a) e 1 (b) sono rappresentati rispettivamente gli andamenti di I_{00} (messo a confronto con I_{01} il cui andamento verrà commentato in seguito) e di $\lambda_p(\Lambda, W)|_{00}$ per $\Lambda = 14.8, 15.0$ e $15.2\text{ }\mu\text{m}$. Nella seconda è presente anche il confronto con valori misurati, ed il buon accordo dimostrato fra i due insiemi di valori conferisce validità al modello matematico adottato. Al tempo stesso, è

possibile trarre dalle figure citate che, con riferimento alle grandezze considerate, il modo SH TM_{00} presenta la massima efficienza nel processo SHG per $W \geq 7$.

Per quanto riguarda il modo TM_{01} , premettiamo una analisi della sua curva di dispersione $n_{eff\,01}(\lambda_p/2, W)$, che viene mostrata in Fig. 2 (a). Infatti la sua pendenza risulta minore rispetto alle curve del tipo $n_{eff\,m0}(\lambda_p/2, W)$, e ciò determina un incrocio delle curve di dispersione dei modi TM_{30} e TM_{40} con quella del modo TM_{01} . Un'analisi effettuata con il FEM (e che non sarebbe possibile usando l'EIM) mette poi in evidenza che le curve di dispersione in realtà non si toccano. Al contrario, esse si curvano senza intersecarsi in prossimità l'una dell'altra, per poi proseguire, sufficientemente lontano dal punto di intersezione "virtuale", assumendo la forma che assumerebbero qualora l'intersezione avesse realmente avuto luogo.

Un comportamento simile dei diagrammi di dispersione è già stato riportato, per esempio con riferimento a guide ARROW, [9] a guide a microstriscia [10] e a guide anisotrope uniassiali [11]. I campi corrispondenti a queste zone delle curve di dispersione, dove i modi sono quasi degeneri, presentano andamenti che non possono essere chiaramente individuati come appartenenti ad un modo o all'altro. Le caratteristiche modali vengono anche qui "recuperate" sufficientemente lontano dalle zone di quasi degenerazione.

In Fig. 1 (a), è possibile notare che il valore calcolato di I_{01} risulta sempre maggiore I_{00} salvo che nell'intorno di $W = 6.5\mu m$ e $W = 9.0\mu m$, dove il modo altera la sua forma a causa della vicinanza di altre soluzioni modali. In Fig 2 (b) è quindi rappresentato l'andamento calcolato di $\lambda_p(\Lambda, W)|_{01}$ per $\Lambda = 18.4, 18.5$ e $18.6\mu m$, escludendo gli intervalli sopra citati, che risultano di non conveniente utilizzo per SHG. Negli intervalli "consentiti" risulta che riguardo alle grandezze considerate, il modo SH TM_{01} presenta caratteristiche di maggior convenienza rispetto al modo TM_{00} . Infatti, oltre ad avere $I_{01} > I_{00}$, risulta essere sempre $\left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial W} \right|_{01} \leq \left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial W} \right|_{00}$ (ad esempio, nell'intervallo $W \in [7.\mu m : 8.5\mu m]$ esse valgono rispettivamente $.2 \frac{nm}{\mu m}$ e $4. \frac{nm}{\mu m}$), e $\left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial \Lambda} \right|_{01} \leq \left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial \Lambda} \right|_{00}$ (i loro valori medi sono rispettivamente $36 \frac{nm}{\mu m}$ e $45 \frac{nm}{\mu m}$).

CONCLUSIONI

È stato proposto un approccio generale basato su un'analisi modale accurata per studiare le caratteristiche di guide APE PPLN per SHG. L'analisi, applicata a guide $Z - cut$, mostra che in linea di principio il modo di ordine superiore TM_{01} può presentare le caratteristiche più attraenti in termini di efficienza e stabilità del processo SHG. Tuttavia, è necessario prestare una particolare attenzione per escludere combinazioni di valori dei parametri di fabbricazione e di condizioni di operazione che potrebbero portare il modo TM_{01} ad essere quasi degenero con altri modi di ordine superiore del tipo TM_{m0} .

RINGRAZIAMENTI

Lavoro svolto con contributi MURST e CNR.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Laurell, Arvidsson, *J. Opt. Soc. Am. B* **5** (1988) 292.
- [2] Bortz, Field, Fejer, Nam, Waarts, Welch, *IEEE Trans. Quantum Electr.* **30** (1994) 2953
- [3] Mizuuchi, Ohta, Yamamoto, Kato *Optics Letters* **22** (1997) 1217
- [4] Katsriku, Rahman, Grattan, *IEEE Journ. Quant. Electr.* **36**, (2000) 282
- [5] Yasui, Koshiba, *IEEE Journ. Lightw. Techn.* **19** (2001) 780
- [6] Bortz, Fejer, *Opt. Lett.* **16** (1991) 1844
- [7] Tartarini, *Optical and Quantum Electronics* **32** (2000) 719
- [8] Cristiani, Liberale, Degiorgio, Tartarini, Bassi, *Optics Comm.* **187** (2001) 263
- [9] Huang, Nathan, *IEEE Journal of Lightwave Technology* **10** (1992) 1015
- [10] Carin, Slade, Webb, *IEEE Transactions Microw. Theory Techn.* **46** (1998) 450
- [11] Knoesen, Gaylord, Moharam, *IEEE J. Lightwave Technology* **6** (1988) 1083

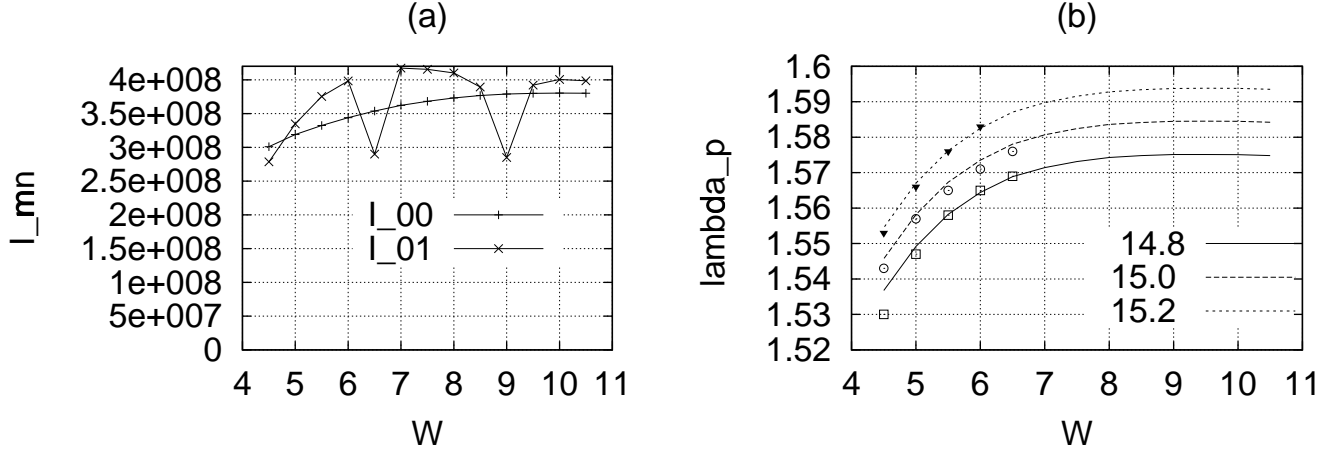


Figura 1: (a) Andamento di I_{00} e I_{01} (u. a.) in funzione di W (espressa in μm). (b) Andamento della lunghezza d'onda di QPM $\lambda_p|_{00}$ (μm) in funzione di W e per Λ pari a 14.8 , 15.0 , 15.2 μm . I punti rappresentano valori misurati sperimentalmente.

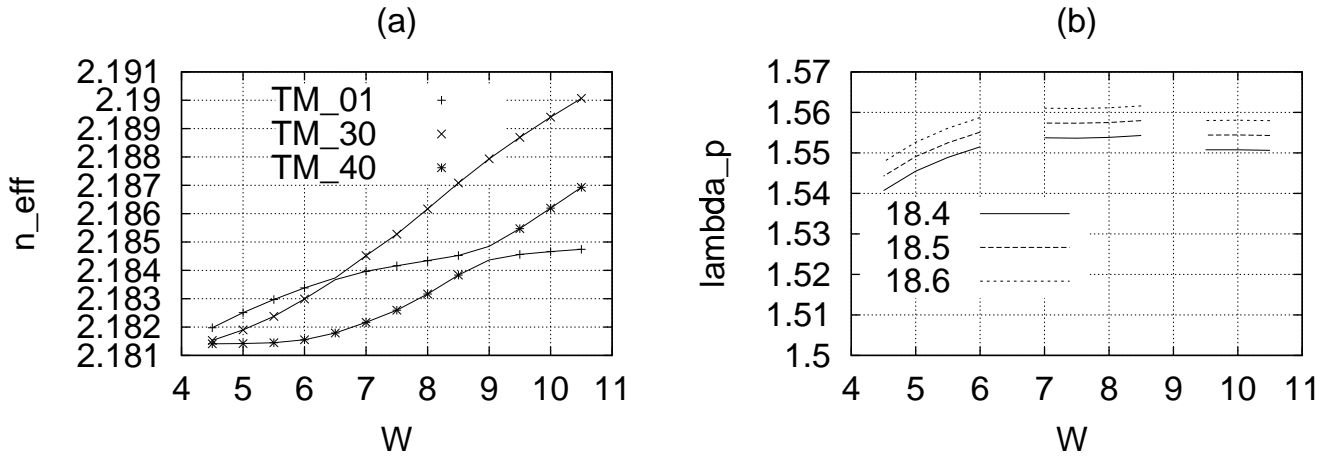


Figura 2: (a) Curve di dispersione $n_{eff}(\lambda_p/2, W)$ dei modi di ordine superiore TM_{01} , TM_{30} e TM_{40} calcolate con il FEM. (b) Andamento calcolato di $\lambda_p|_{01}$ (μm) in funzione di W e per Λ pari a 18.4 , 18.5 , 18.6 μm . In quest'ultima figura sono state escluse le zone nelle quali si ha quasi degenerazione con i modi TM_{30} e TM_{40} .