

最近の技術から

半導体レーザーと位相共役波

伊藤 弘 昌

東北大学電気通信研究所 〒980 仙台市片平 2-1-1

1. ま え が き

半導体レーザーは近年の進歩により、コヒーレンスの高いレーザーの一つとして量子エレクトロニクスの分野でも種々の研究が行なえるようになってきた。その一つが半導体レーザー中での4光波混合と位相共役波発生¹⁾の研究である。一般に4光波混合は、媒質の非線形性があまり大きくないことからその効率は低い。効率の向上には、共振器構造を用いたり、共鳴効果や増幅媒質を用いることが有効である。またレーザー共振器内部で相互作用を行なわせることができれば、共振器効果とともに共振器内部の発振光を直接ポンピングに用いることができる。また増幅効果も利用できる。

半導体レーザーはこれらの特質を全て兼ね備えている材料である。最近の研究によって、半導体レーザー内部で励起光がわずかに数 mW のレベルで、効率よく4光波混合や位相共役波発生が実現できることが報告され、その理論的背景についても研究が進められている。

2. 半導体レーザーによる位相共役波の発生原理

半導体レーザーの活性層自体を、反転分布した共鳴媒質として用いる位相共役波の発生は1985年にNakajimaらのグループによって初めて報告された²⁾。以来内外のいくつかの研究グループによって理論および実験の双方から研究が進められている。半導体レーザーの活性層内での4光波混合は、利得媒質であるとともに光共振器内での動作であり、またポンプ波とプローブ波、位相共役波が同一軸上で動作することから大きな相互作用体積が得られ、高効率な動作が得られている。

この半導体レーザー中での4光波混合による位相共役波発生動作については、2通りの考え方がある。一つは反転2単位共鳴理論によるもの^{2,4)}で、他は活性層内のキャリア密度が非縮退した周波数差に相当したビート周期で変調されることから生じるフェーズグレーティングの考え方⁵⁾である。前者の2単位モデルによる解析は、

従来の原子系に対する一般的な取扱いを半導体レーザー媒質に拡張するもので、理論的な見通しはよい。しかし2単位系とデバイスのパラメータの対応が直接的でなかったり、半導体レーザー内の導波路や空間的なキャリアによる屈折率変化などの取り込みがむずかしい。後者のキャリアグレーティングによる考え方については最近詳しい報告もあり⁶⁾、スペクトルホールバーニングによる効果も検討されている。

3. 半導体レーザーにおける4光波混合の実験

半導体レーザー中での4光波混合では、位相共役波はプローブ波、ポンプ波と同一光軸上にあり、このため相互作用の効率は上がるが、一方そのままでは共役波の分離検出が難しい。このため、ポンプ波と位相共役波にごくわずかに周波数差をもたせることにより、周波数軸上で分離検出を行なう方法が取られている。

表1は半導体レーザー中の4光波混合による位相共役波発生^{2,6-10)}の報告をまとめたもので、いずれも高い効率が得られている。半導体レーザーの共振器を利用したものや、端面反射率を0.03%程度に抑えた進行波形増幅器を用いて同一光軸上で相互作用させるものと、幅広いストライプをもつ半導体レーザー中で空間的に分離するものに分類される。同一光軸上の動作では、信号光の識別は周波数軸上でごくわずかにずれたプローブ光($\omega + \Delta\omega$)により、近縮退条件で発生する($\omega - \Delta\omega$)の周波数成分を測定することによって行なっている。

われわれはスミス型の干渉計を半導体レーザーの外部に構成し、その出力光の一部を等速移動する反射鏡により位相シフトを与えた後、4光波混合のプローブ光として半導体レーザー中に再注入して、半導体レーザー中で4光波混合を実現している。発生する位相共役波の識別には、光検出器で2乗検波される出力をスペクトル解析することにより行なう。すなわち検波出力には、反射鏡の等速移動運動に対応した周波数成分 I_{ϕ} とともに、位相共役波の働きで2倍の周波数成分の出力 $I_{2\phi}$ が現われる。光検出器への入射光成分を理論的に詳細に検討する

表 1 半導体レーザーの活性層中での 4 光波混合の実験

TYPE	λ (μm)	Δf (GHz)	P _{PUMP}	P _{PROBE}	R _{CONJ} (%)	MEASURE- MENT	NOTE	REFERENCE
ON-AXIS RESONATOR	0.83	-0.3	~ mW		500	F-P		NAKAJIMA et.al. ³⁾ Ecole Polytech
ON-AXIS RESONATOR	0.83	-2	~ mW		5000	F-P		NAKAJIMA et.al. ²⁾ Ecole Polytech
ON-AXIS RESONATOR	0.83	-5	7 mW	Dye LASER $\Delta\nu=50\text{MHz}$		F-P	$\chi^{(3)} \sim 7 \times 10^{-3}$ (esu)	NIETZKE et.al. ⁶⁾ Philipps Univ.
ON-AXIS RESONATOR	1.3	4 Hz	~ mW	~ μW	150	INTER- FEROMETER	$\chi^{(3)} \sim 8 \times 10^{-8}$ (esu)	ZHANG et.al. ⁷⁾ Tohoku Univ.
OFF-AXIS	0.83	0.2-10				SPATIAL ANGLE	Broad Area LD	LUCENTE et.al. ⁸⁾ M.I.T.
ON-AXIS TW AMP	1.52	-1.5	1.6 mW	23 μW F-center		F-P	FACET REFLECTIVITY $R < 3 \times 10^{-4}$	INOUE et.al. ⁹⁾ N.T.T.
ON-AXIS TW AMP	1.3	0.2-10	10 μW	TE: -15dB TM: -27db		HETERODYNE	FACET REFLECTIVITY $R < 3.6 \times 10^{-4}$	GROSSKOPF et.al. ¹⁰⁾ H.H.I.

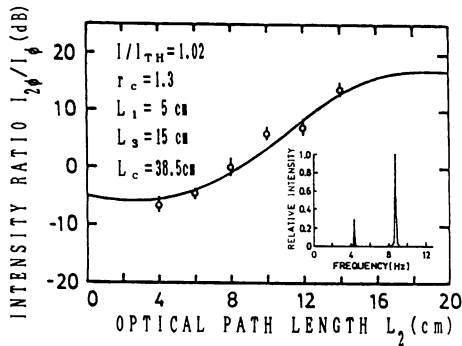


図 1 1.3 μm 帯 DFB 半導体レーザーからの位相共役波の信号強度比の光路長に対する依存性

ことにより、 $I_{2\phi}/I_\phi$ の測定から 4 光波混合に基づく位相共役反射率を求めることができる。一方光源のコヒーレンス長が有限なため、 $I_{2\phi}/I_\phi$ の値は光路差に依存する。図 1 はこの $I_{2\phi}/I_\phi$ の計算結果と対応した実験結果の一例を示す。図中のスペクトルは解析した信号光の一例を示すもので、半導体レーザー内の大きな非線形性により、基本成分より大きな共役波成分が得られていることを示している。この結果より、半導体レーザー媒質を反転分布した 2 準位系と考えた解析に基づいて半導体レ

ザー活性層の $\chi^{(3)}$ を求めることができ、 8×10^{-8} esu の値を得た。

位相シフトしたプローブ光を用いたレーザー媒質による位相共役波の発生・検出は、一般のレーザーにも適用できる新しい方法である¹¹⁾。

日頃ご指導いただく稲場文男教授、ならびに討論いただいている山形大学丹野直弘教授に感謝いたします。

文 献

- 1) 丹野直弘: 光学, 9 (1980) 213; R.L. Fisher, ed.: *Optical Phase Conjugation* (Academic Press, Orlando, 1983).
- 2) R.L. Abram and R.C. Lind: *Opt. Lett.*, 2 (1978) 94; 3 (1978) 205.
- 3) H. Nakajima and R. Frey: *Phys. Rev. Lett.*, 54(1985) 1798; *Appl. Phys. Lett.*, 47 (1985) 769.
- 4) R. Frey: *Opt. Lett.*, 11 (1986) 91.
- 5) G.P. Agrawal: *J. Opt. Soc. Am. B*, 5 (1988) 147.
- 6) R. Nietzke, et al.: *Appl. Phys. Lett.*, 51 (1987) 1298.
- 7) N. Zhang, et al.: IQEC '88, TuF-7 (1988).
- 8) M. Lucente, et al.: IQEC '88, TuF-9 (1988).
- 9) K. Inoue, et al.: *Appl. Phys. Lett.*, 51 (1987) 1051.
- 10) G. Grosskopf, et al.: *Electron. Lett.*, 24 (1988) 31.
- 11) N. Tan-no, et al.: IQEC '88, PD-4 (1988).

(1988年11月11日受理)