

体積型ホログラフィック回折格子を用いた外部共振器型半導体レーザーの特性評価

電気通信大学電気通信学部量子・物質工学科
岸本研究室
学籍番号：0913011
生澤 謙太郎

【研究背景・目的】

我々の研究室では ^{87}Rb をレーザー冷却するために、外部共振器型半導体レーザー（以下、“ECDL”と呼ぶ）で飽和吸収分光法により波長 780.25nm のコヒーレント光に安定化している。波長が安定である ECDL を組むことは重要なことである。我々は既に安定な ECDL を実現しているが、今後実験系が増えるにつれて多くの光源が必要になるため、製作が容易かつコンパクトかつ安定的な ECDL の開発を目指す。

今回、我々は体積型ホログラフィック回折格子（以下、“VHG”と呼ぶ）を用いた ECDL に着目した[1]。VHG はブラッグ角で設計波長の光のみを数十%回折させ、残りは透過する。これにより LD の前方に VHG を配置（図 1）するだけで設計波長のコヒーレント光を発振させることが出来る[2][3][4]。従来よりシンプルで、製作が容易かつコンパクトな ECDL システムが構築できると期待される。

VHG を用いた光源の例として、LD と VHG が一つの管の中にパッケージされた製品がある。VHG を用いた ECDL の特徴として、VHG は吸収が少ないので数十 W のハイパワーが出せる、単一モード、偏光依存がない、線幅 200GHz 程度（VHG の厚み 0.5mm ）などがある。

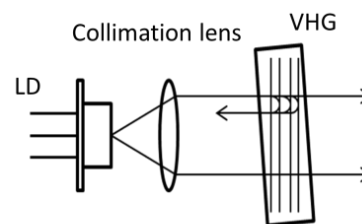


図 1. 発振原理概略

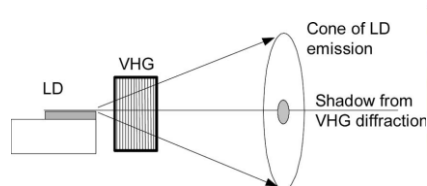


図 2. VHG を用いた光源の例[2]



図 3. 一体化された光源

(ONDAX 社ホームページより)

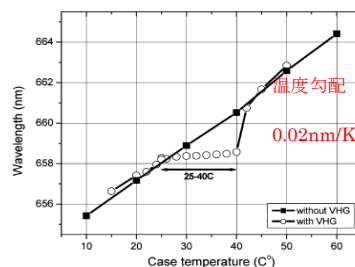


図 4. 波長ロック[2]

^{87}Rb 原子の自然幅は 6MHz なので、線幅が MHz 以下の光源が必要である。 200MHz では線幅が広いので共振器長を伸ばして、線幅の細い VHG を用いた ECDL を目指す。

【原理】

VHG は BK7 ガラスに対し屈折率差のある層が幾層にも刻み込まれた回折格子である（図 5）。

厚み L が小さいものを平面ホログラムと呼ばれる。二つの隣接する層からの反射回折光路差が強め合う条件（次式(1)）の時、複数の高次回折光が生じる。

$$D \sin \theta_{out} - D \sin \theta_{in} = \frac{m\lambda}{n} \quad (m = \pm 1, \pm 2 \dots) \dots (1)$$

一方、厚み L が大きいものを体積型ホログラムと呼ばれる。ブラッグ条件(図 6)に従い、屈折率を n 、層間隔を D 、入射角度を θ として、次式(2)の波長 λ の光を回折させる。

$$\text{ブラッグ波長 } \lambda_{\theta} = 2n \cdot D \cdot \cos(\theta) \dots (2)$$

$\theta=0^{\circ}$ で入射させれば回折光が LD 端面に戻り、共振器構造を取ることが出来る。この時、波長 $\lambda=2n \cdot D$ の光が共振され、LD から発振される。図 7 のように、まず LD Gain カーブが VHG のバンド幅により切り取られ、次に外部共振 (External Cavity) によって切り取られる。

また一般的なグレーティングはバンド幅 $\Delta\lambda$ が、ビーム半径を w 、回折角を β として、次式(3)で表される。

$$\text{Grating のバンド幅 } \Delta\lambda_{Grating} = \frac{\lambda^2}{\pi \cdot 2 \cdot w \cdot \tan \beta} \dots (3)$$

これに対し、VHG のバンド幅 $\Delta\lambda$ は VHG の厚みを L として、次式(4)で表される。

$$\text{VHG のバンド幅 } \Delta\lambda_{VHG} = \frac{\lambda^2}{\pi \cdot L} \dots (4)$$

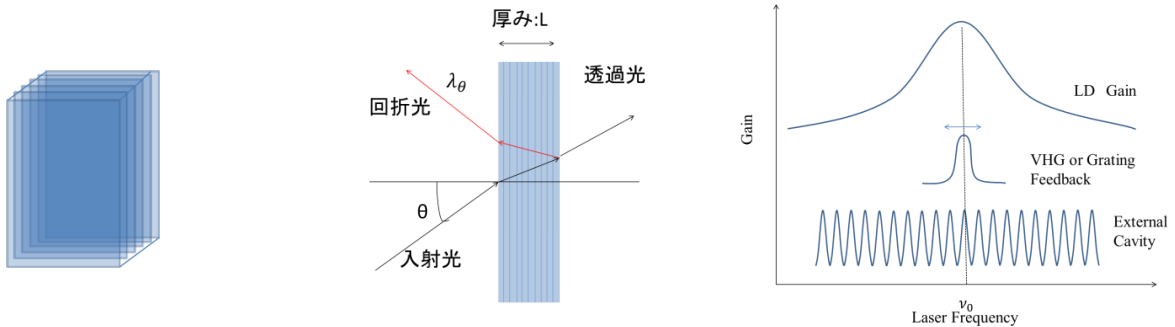


図 5. VHG のイメージ図

図 6. ブラッグ条件

図 7. ECDL の利得過程

【開発・評価】

・ VHG の特性評価

今回用意できた VHG は、入射角と回折角が重なる角度 θ' (上記の $\theta=0^{\circ}$) において設計波長 780.25nm(Actual~780.32nm)、バンド幅は 0.13nm (64GHz)、回折効率 14%、サイズ 6.5×3.0×1.5mm(ONDAX 社製)であった。しかし、今回目指す波長は 780.25nm であったので、設計波長から 0.07nm ずれていた。VHG の特性評価に関する先行研究[2] (図 2) を参考にすると、彼らとしては温度勾配 0.02nm/K で波長ロックできていると言っているが、原子冷却の観点からだとロックできていると言えない。逆にこれを利用し、VHG の温度を変化させ、ブラッグ波長が変えることにより 780.25nm にシフトできると考えた。

まず、これを確認するために、図 8 のような実験系を組み、この VHG に波長 780.25nm レーザ光を当てて回折効率の温度依存を測定した (図 9)。VHG の温度が 26℃で回折効率のピーク

は入射角度 0.4° のときである。温度が低くなる程このピークが左にシフトしていることが分かる。これにより、VHG の回折効率は温度依存するということが分かった。

また、図 8 の PBS と VHG の間に $\lambda/4$ 板をいれ、 $\beta'=0^\circ$ (入射角と反射角が重なる角度) 時の回折効率の温度依存を測定した(図 10)。これを見ると、 $16\sim 23^\circ\text{C}$ の範囲で回折効率が 10% 以上、 19°C 付近で最大値 14% となることが分かった。このことから、VHG を用いて ECDL を組んだとき、VHG の温度を 19°C に温調すれば、波長 780.25nm 帯の光に対して最大回折効率 14% で LD にフィードバックできると見積もられた。

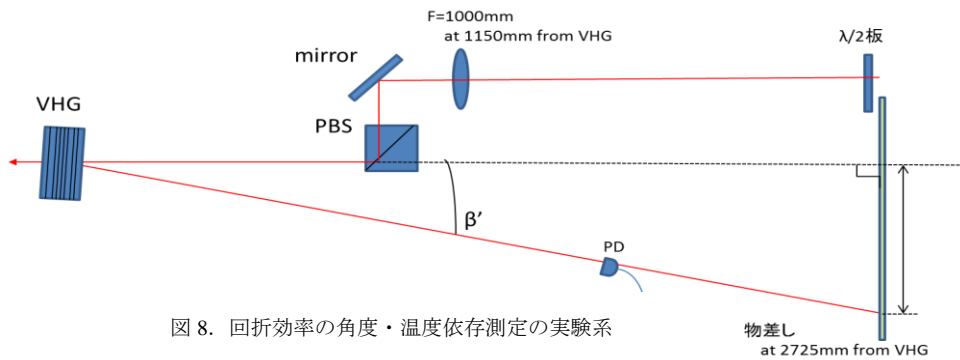


図 8. 回折効率の角度・温度依存測定の実験系

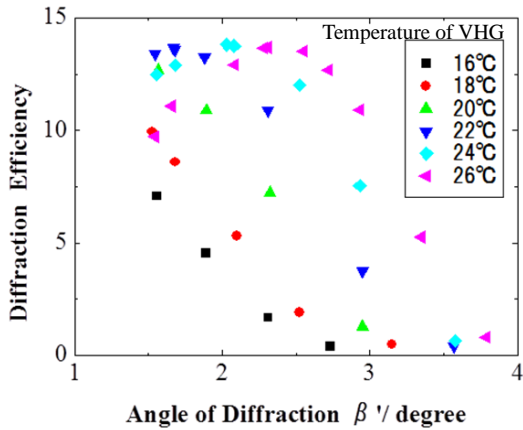


図 9. 回折効率の角度・温度依存性

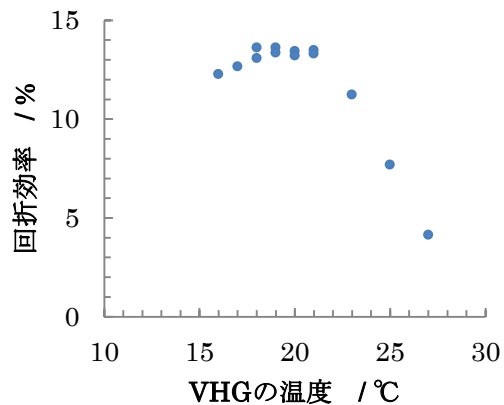


図 10. 入射角=回折角での温度依存性

・VHG_ECDL の設計と評価

上記の結果から回折効率の角度・温度依存性が認められ、さらに最大回折効率温度が 19°C と分かったので、VHG を用いた ECDL を設計、製作した。設計思想は、①VHG を独立に温調する必要があったので LD の温調と干渉しないようにすること、②発振波長の安定化と波長掃引のために共振器長、VHG 角度を piezo 素子で微調節できるようにしたことである。実際に制作したものが図 11 である。

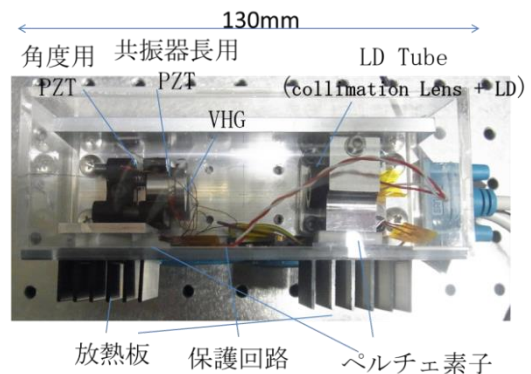


図 11. 制作した VHG_ECDL

初めて発振したとき、閾値が 40mA 、 87mA のとき 35mW だった。本研究室にある Grating

を用いた ECDL が閾値:65mA、120mA の時 40mA であるので、これに比べると効率の良い ECDL となった。I-P 特性は図 12 のようになった (LD への戻り光を防ぐため、パワーメータを斜めにしたので強度が 1 割程度小さく測定されている)。VHG の温度を 19°C に設定して、波長を測ったところ 780.246nm であり、欲しい波長を得ることができた。一方で温調をせずとも常温で電流値を数 mA 動かすだけで波長を動かすことができ、780.248nm に合わせることができた。

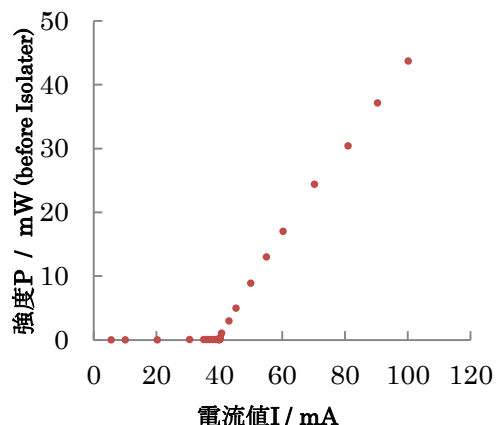


図 12. 制作した ECDL の I-P 特性

この VHG_ECDL で飽和吸収分光し、従来の ECDL と比較してみた。従来のものは 87Rb F=2→F' から 85Rb F=3→F' までしか見えないのに対し、今回のものは 87Rb F=2→F' から 85Rb F=2→F' までモードホップせず見ることができた。図 15 を参照すると、モードホップフリーレンジが従来のものより 2GHz 大きい 6GHz 以上あることが分かった。これだけ大きければ飽和吸収ロックしやすく、冷却系の光源として使えるだろう。

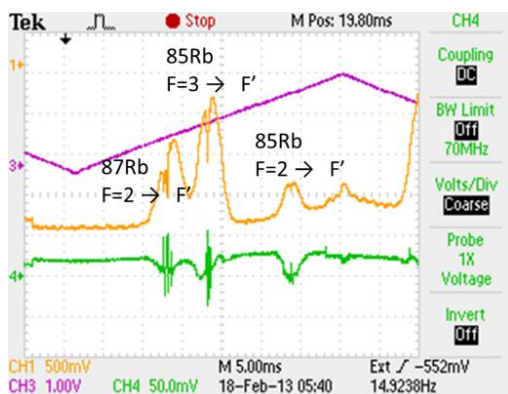


図 13. VHG を用いた ECDL による飽和吸収分光

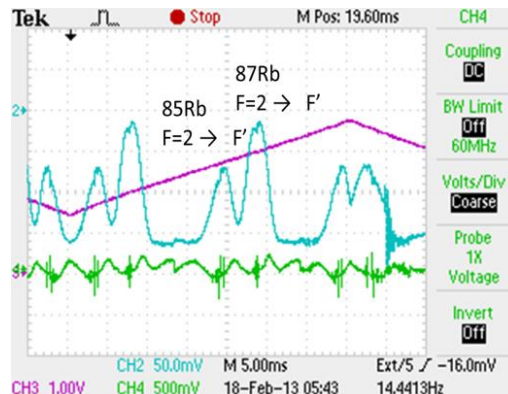


図 14. 従来の Grating を用いた ECDL による飽和吸収分光

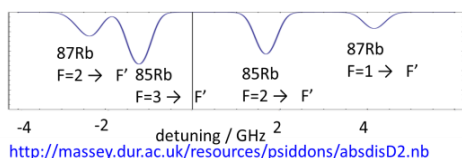


図 15. Rb 原子の飽和吸収の理論値

今後の計画

まず、上記のようにしてモードホップレンジが大きくなるように調整する。次に、この VHG は常温でも 780.25nm 帯で発振することが分かったので、VHG の温調を取り除き、更にシンプルで、振動伝達要因の少ない系を組む。

参考文献

- [1] P. Mills et al., Electron. Lett., **21**, 15 (1985) [2] G. J. Steckman et al., IEEE J. Quantum Electron., **13**, 672 (2007)
 [3] C. Moser et al., Opt. Express, **16**, 16691 (2008) [4] T. Hieta et al., Opt. Comm., **282**, 3119 (2009)