

Khảo sát laser bán dẫn công suất cao phản hồi phân bố có độ rộng vạch phổ siêu hẹp

Investigation of highpower Distributed Feedback diode lasers with ultra-narrow linewidth

Nguyễn Thanh Phương

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội - Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Đến Tòa soạn: 06-3-2018; chấp nhận đăng: 28-9-2018

Tóm tắt

Laser bán dẫn công suất cao phát xạ vùng hồng ngoại gần có rất nhiều ứng dụng trong đời sống cũng như trong nghiên cứu do tính chất gọn nhỏ, hiệu suất biến đổi quang điện cao, độ tin cậy cao. Các ứng dụng cần độ chính xác cao như đồng hồ nguyên tử, phổ hấp thụ nguyên tử... đòi hỏi các laser có độ rộng vạch phổ hẹp ở vùng công suất cao. Do đó việc xác định độ rộng vạch phổ của các nguồn laser là rất quan trọng. Bài báo này cung cấp kỹ thuật đo độ rộng vạch phổ của các laser có độ rộng siêu hẹp. Trên cơ sở phương pháp đó, laser bán dẫn DFB phát xạ vùng 780 nm được khảo sát cho thấy độ rộng vạch phổ ở công suất quang ra 250 mW tại 25°C là 19 KHz.

Từ khóa: laser bán dẫn công suất cao, laser vạch phổ hẹp, self-delayed heterodyne

Abstract

High power diode lasers emitting at near infrared have many important applications because of their compactness, high energy-conversion efficiency and their reliability. Some high-accuracy applications such as: atomic clock, atomic absorption... require lasers with narrow linewidth at high output power. Therefore, measuring linewidth of the lasers is very necessary. In this report, techniques to characterize ultra-narrow linewidth laser are shown. Base on these technique, semiconductor 780 nm DFB laser is investigated having linewidth of 19 KHz at 250 mW output power and 25°C.

Keywords: high power diode laser, narrow linewidth laser, self-delayed heterodyne.

1. Mở đầu

Laser công suất cao bước sóng vùng hồng ngoại gần bức xạ đơn mode ngày nay có rất nhiều ứng dụng như trong phổ phân giải cao, đồng hồ nguyên tử, đo lường chính xác cao... [1-5]. Các nguồn laser bán dẫn với cấu trúc cách tử nội, phản hồi phân bố (Distributed Feedback: DFB) là một trong những nguồn tối ưu cho các ứng dụng này. Ưu điểm nổi trội của các nguồn laser này là gọn nhỏ so với các nguồn laser khác, hiệu suất biến đổi quang điện cao, độ tin cậy cao... Đối với nhiều ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao, độ rộng vạch phổ của laser là một yêu cầu quan trọng, các ứng dụng đó cần các nguồn laser có độ rộng vạch phổ hẹp ở vùng công suất cao. Do đó, việc xác định độ rộng vạch phổ của laser rất quan trọng, từ đây cung cấp các thông tin cần thiết của laser nhằm đáp ứng các ứng dụng trên. Để xác định độ rộng vạch phổ, một số phương pháp được sử dụng như: các phương pháp dựa trên cơ chế giao thoa, nhiễu xạ trong máy phân tích phổ (OSA), phương pháp dựa trên buồng cộng hưởng Fabry-Perot [6], kỹ thuật phân tách các pha Coherent discrimination [6,7], kỹ thuật self-delayed

heterodyne/homodyne [8] và kỹ thuật heterodyne [6]. Các máy phân tích phổ trên thị trường, độ phân giải thường bị giới hạn ở mức cỡ hàng chục GHz. Buồng cộng hưởng Fabry-Perot, độ phân giải nằm ở mức cỡ hàng chục MHz. Kỹ thuật Coherent discrimination cho phép đo đặc với độ phân giải cao, tuy nhiên kỹ thuật này đòi hỏi việc xây dựng hệ đo rất phức tạp [6,7]. Giải pháp đơn giản hơn đó là sử dụng kỹ thuật self-delayed homodyne, nhưng kỹ thuật này dẫn đến việc tín hiệu "beat note" nằm tại vị trí 0 Hz, vùng giá trị bị ảnh hưởng rất lớn bởi nhiễu tần số thấp [8]. Trong kỹ thuật heterodyne, tín hiệu "beat note" không nằm tại giá trị 0 Hz, tuy nhiên độ phân giải của phép đo phụ thuộc vào laser so sánh [8]. Để dung hòa giữa hai yêu cầu: độ phân giải cao và hệ đo không quá phức tạp, kỹ thuật self-delayed-heterodyne được sử dụng để xác định độ rộng vạch phổ của laser bán dẫn DFB.

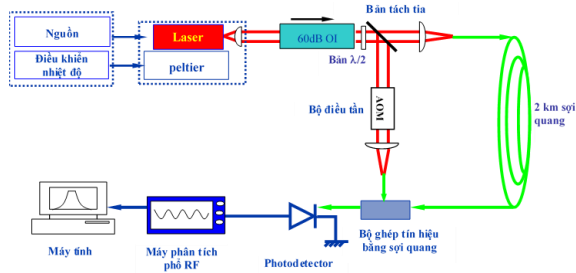
Giá trị độ rộng vạch phổ của laser thu được phụ thuộc không nhỏ vào phương pháp ghi và phân tích dữ liệu do ảnh hưởng của các nguồn nhiễu. Bài báo này mô tả kỹ thuật self-delayed-heterodyne và so sánh hai phương pháp ghi và phân tích dữ liệu thu được từ hệ

* Địa chỉ liên hệ: Tel.: (+84) 936132266
Email: Phuong.nguyenthanh@hust.edu.vn

đo. Kết quả thực nghiệm đối với laser DFB phát xạ ở vùng bước sóng 780 nm cho thấy phương pháp tối ưu trong đo đặc xác định độ rộng vạch phổ của laser.

2. Hệ đo seft-delayed-heterodyne

Hệ đo độ rộng vạch phổ của laser được mô tả như hình 1. Nguồn nuôi có độ chính xác cao và nhiều dòng thấp (Lightwave ILX-LDC 3724B) cung cấp dòng cho laser cần đo. Nguồn này đi kèm điều khiển nhiệt độ cho phép điều khiển nhiệt độ hoạt động của laser thông qua peltier. Tín hiệu laser được hội tụ và đi qua một bộ cách ly quang học (optical isolator) Qioptiq DLI, 60 dB. Bộ này có tác dụng ngăn tín hiệu laser phản xạ trở lại buồng cộng hưởng. Sau khi qua bộ cách ly quang học, tín hiệu laser được chia ra thành hai phần nhờ một bộ tách tia gồm một bản nửa bước sóng (Thorlabs AQWP05M-950) và bản tách tia nhờ cơ chế phân cực (Linos G335-725-000). Tín hiệu ra khỏi bộ tách tia, một phần được đưa trực tiếp vào bộ điều tần (IntraAction ATM-804DA2B) làm dịch tần số tới 78 MHz, sau đó được hội tụ vào bộ ghép tín hiệu bằng sợi quang (Fiber coupler). Phần tín hiệu còn lại đi qua hệ thống sợi quang dài 2 km, pha của tín hiệu laser thay đổi trước khi vào bộ ghép tín hiệu. Tại bộ ghép tín hiệu xảy ra giao thoa, tín hiệu giao thoa được thu bằng photodetector nhanh (New Focus 1554-B) có băng thông 3 dB ở 12GHz và ghi bằng máy phân tích phổ RF (FSW 26 by Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG).



Hình 1. Hệ đo seft-delayed-heterodyne đo độ rộng vạch phổ của laser.

3. Cơ sở phương pháp đo

3.1. Phương pháp đo phổ năng lượng phụ thuộc tần số và phân tích kết quả theo phương pháp fit hàm Voigt.

Giả sử laser được đo có tần số ν_s , sau khi đi qua bộ tách tia, phần đi qua bộ điều tần, tần số bị dịch chuyển đi một đoạn là $(\nu_s - \delta\nu)$. Tín hiệu laser trước bộ ghép tia được mô tả:

$$E_1(t) = E_0 \exp \{j[2\pi\nu_s t + \phi(t - \tau)]\} \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_0 \exp \{j[2\pi(\nu_s - \delta\nu)t + \phi(t)]\}.$$

Trong đó E_1, E_2 là trường điện của tín hiệu laser tương ứng đi qua sợi quang 2 km và qua bộ điều tần. ϕ là pha của tín hiệu, phụ thuộc thời gian. Lúc này tín hiệu đi qua sợi quang bị trễ pha phụ thuộc vào thời gian truyền và tần số trung tâm qua bộ điều tần dịch đến vị trí $(\nu_s - \delta\nu)$. Tại đầu thu photodetector trường giao thoa có giá trị :

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) \quad (2)$$

Công suất quang tương ứng $P \propto |E|^2$, như vậy dòng mà photodetector thu được lúc này được mô tả :

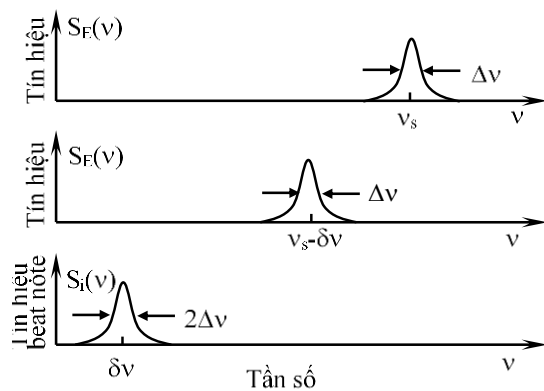
$$I(t) = \eta |E(t)|^2 \quad (3)$$

η ở đây là độ nhạy của đầu thu (đơn vị đo A/W). Như vậy tín hiệu điện mà ta phân tích bằng máy phân tích phổ RF được ghi trong “miền thời gian” là một hàm của độ dịch pha giữa hai trường quang học $\Delta\phi(t)$.

$$I(t) = \eta \{P_1 + P_2 + 1\sqrt{P_1 P_2} \cos[2\pi\nu_{IF} t + \Delta\phi(t)]\} \quad (4)$$

Tần số trung tâm dịch chuyển về vị trí :

$$\nu_{IF} = \nu_s - (\nu_s - \delta\nu) = \delta\nu \quad (5)$$



Hình 2. Cơ chế dịch chuyển tần số laser ν_s về tần số $\delta\nu$ trong hệ đo self-delayed-heterodyne.

Ta giả thiết phổ tín hiệu có dạng Lorentz thì độ bán rộng của tín hiệu “beat note” thu được có giá trị bằng $2\Delta\nu$. Hình dạng phổ được miêu tả

$$S_L(\nu, t) \sim \frac{1}{1 + \left[\frac{\nu - \nu_{IF} + \delta\nu(t)}{\Delta\nu/2} \right]^2} \quad (6)$$

Phổ RF thu được có dạng Lorentz. Tuy nhiên các nguồn nhiễu sẽ gây ảnh hưởng đến hình dạng phổ,

những nguồn này được miêu tả dưới dạng gần đúng $1/f$. Do đó, dạng Lorentz trong thực nghiệm sẽ bị thay đổi, có xu hướng chuyển sang dạng Gauss, tương ứng sự nở rộng vạch không đồng nhất của phổ bức xạ. Phổ dạng Gauss được miêu tả bởi [9]:

$$S_G(v) = \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi}} \frac{1}{\Delta v_G} \exp \left[-4\ln 2 \left(\frac{v - v_{IF}}{\Delta v_G} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Δv_G là độ bán rộng của phổ dạng Gauss.

Khắc phục nhược điểm của hai dạng phổ, dạng Voigt được xem như là sự kết hợp giữa Lorentz và Gauss [9, 10].

$$S_V(v) = 2 \int_0^\infty S_G(v') S_L(v - v') dv' \quad (8)$$

Hàm Voigt biểu diễn đáng điệu của Lorentz ở vùng cánh và Gauss ở vùng trung tâm đường phổ. Mỗi quan hệ giữa độ rộng phổ Δv và vị trí đo độ rộng phổ tại các mức năng lượng tương đối từ hàm Voigt được thể hiện ở bảng 1.

Bảng 1: Giá trị độ rộng vạch phổ tương ứng tại các mức cường độ tương đối từ hàm dạng Voigt

Cường độ tương đối	-3dB	-10dB	-20dB
Giá trị tương ứng	$2\Delta v$	$\sqrt{9}$ $(2\Delta v)$	$\sqrt{99}$ $(2\Delta v)$

Độ rộng Δv trong trường hợp này phụ thuộc vào thời gian trễ pha giữa hai pha, hay nói cách khác phụ thuộc vào độ dài sợi quang L_c .

$$\Delta v_{MIN} = \frac{v_g}{\pi L_c} \quad (9)$$

Trong đó $v_g = c/n_g$ là vận tốc nhóm của tín hiệu laser truyền trong sợi quang có chiết suất nhóm n_g . Như vậy với độ dài sợi quang 2 km, phương pháp này cho phép xác định được độ rộng vạch phổ nhỏ nhất xấp xỉ 30 kHz.

3.2 Phương pháp đo phổ công suất nhiều tần số

Để khắc phục sự phụ thuộc vào thời gian trễ, một phương pháp ghi và phân tích kết quả khác được sử dụng. Trong phương pháp này, thay thế việc phổ được ghi trong “miền thời gian” bằng ghi trong “miền tần số”. Hàm mật độ phổ công suất của nhiều tần số được biểu diễn dưới dạng

$$S_V(v) = S_\phi(v)v^2 \quad (10)$$

Trong đó $S_\phi(v)$ là hàm mật độ công suất của nhiều pha $\phi(t)$.

Để xác định độ rộng phổ, đầu tiên tín hiệu được chuyển từ tín hiệu RF như phương trình (4) sang tín hiệu trung gian gồm thành phần cùng pha I và thành phần vuông góc Q. Các thông tin nhiều pha phụ thuộc thời gian được rút ra từ dữ liệu IQ. Mật độ phổ công suất nhiều pha được biểu diễn dưới dạng [11]:

$$S_\phi(v) = \frac{T}{N^2} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \phi(n\Delta t) e^{2\pi i v n \Delta t} \right|^2 \quad (11)$$

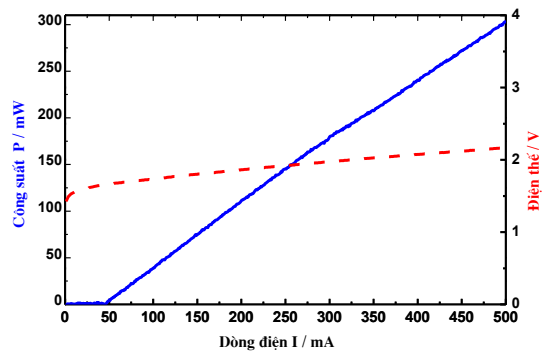
Trong đó Δt là nghịch đảo của tốc độ lấy mẫu và $T = N \cdot \Delta t$ là thời gian đo, n là số lần lấy mẫu. Cuối cùng chuyển đổi tín hiệu từ phổ mật độ công suất nhiều pha sang phổ mật độ công suất nhiều tần số như phương trình (10). Như vậy, với phương pháp ghi và phân tích kết quả này, độ rộng vạch phổ thực chất của tín hiệu là:

$$\Delta v = \frac{\Delta v_{beatnote}}{2} = \frac{\pi S_V}{2} \quad (12)$$

không phụ thuộc vào thời gian trễ pha giữa 2 tín hiệu.

4. Kết quả thực nghiệm

Trong phần này kết quả đo đặc và phân tích độ rộng vạch phổ của laser bán dẫn DFB phát xạ ở vùng bước sóng 780 nm được tiến hành theo cả hai phương pháp và so sánh kết quả.

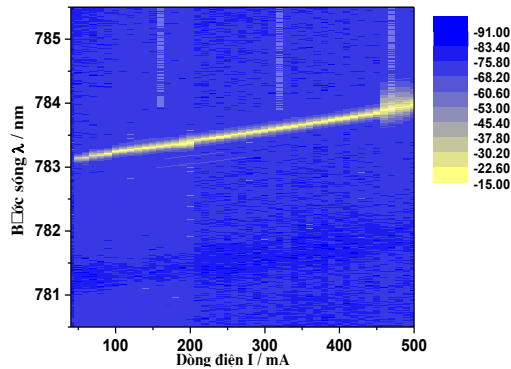


Hình 3. Đặc trưng công suất và thế phụ thuộc dòng bơm của laser bán dẫn DFB phát xạ vùng 780 nm tại nhiệt độ 25°C. Dòng ngưỡng là 47 mA, công suất cực đại là 303 mW.

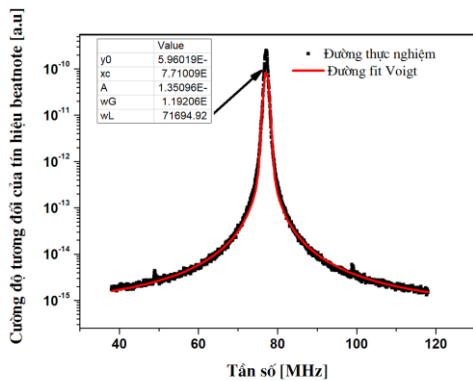
Trước tiên, đặc trưng công suất và thế phụ thuộc dòng bơm và đặc trưng phổ của laser được khảo sát để làm cơ sở tiến hành đo độ rộng vạch phổ. Toàn bộ các đo đạc được tiến hành ở nhiệt độ 25°C. Hình 3 là đặc trưng công suất và thế phụ thuộc dòng bơm của laser

thử nghiệm. Dòng ngưỡng của laser $I_{th} = 47$ mA. Đường đặc trưng công suất phụ thuộc dòng bơm tương đối tuyến tính đến công suất cực đại $P_{max} = 303$ mW tại dòng bơm $I = 500$ mA. Hệ số biến đổi quang điện $\eta = 0.67$ W/A.

Hình 4 là đặc trưng phổ phụ thuộc dòng bơm của laser thử nghiệm. Dòng bơm từ 50 mA đến 500 mA với bước nhảy là 10 mA. Kết quả cho thấy laser hoạt động đơn mode cho đến dòng bơm đạt 460 m, có hiện tượng nhảy mode tại vị trí dòng bơm 200 mA.



Hình 4. Đặc trưng phổ phụ thuộc dòng bơm của laser bán dẫn DFB phát xạ vùng 780 nm tại nhiệt độ 25°C.



Hình 5. Phổ RF của tín hiệu beatnote của laser 780 nm đo trên hệ đo self-delayed heterodyne sử dụng phương pháp fit hàm Voigt. Giá trị độ rộng $2\Delta\nu$ tại - 3 dB là 71694 Hz.

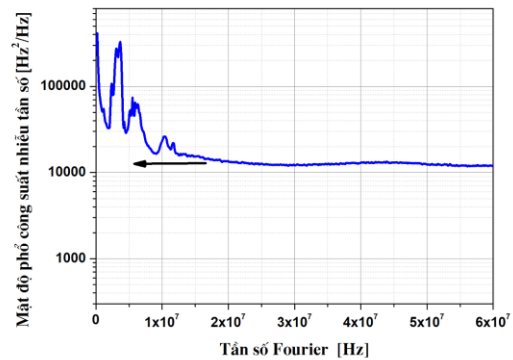
Từ kết quả đo đặc trưng quang điện của laser DFB 780 nm, độ rộng vạch phổ được đo khảo sát tại công suất quang ra của laser 250 mW (tương ứng với dòng bơm 417 mA), tại đó laser phát đơn mode và không có nhảy mode.

Hình 5 là phổ RF của tín hiệu “beatnote” của laser 780 nm sau khi đi qua hệ đo được mô tả như trên hình 1. Cường độ tương đối của tín hiệu “betanote” phụ thuộc vào tần số với tần số trung tâm là 78 MHz. Sử dụng phương pháp fit hàm Voigt thu được kết quả độ rộng vạch phổ thực của tín hiệu beatnote tại vị trí - 3

dB có giá trị 71694 Hz. Như vậy độ rộng phổ thực $\Delta\nu$ của laser DFB 780 nm đo được bằng phương pháp này là xấp xỉ 35 kHz.

Hình 6 là phổ công suất nhiều tần số của laser được đo ở công suất quang ra 250 mW tại nhiệt độ 25°C. Tốc độ ghi dữ liệu IQ là 150 MS/s với dải rộng là 120 MHz. Thời gian đo là 100 ms, về lý thuyết cho phép độ phân giải của tần số tới hàng chục Hz [11].

Kết quả thu được từ phép đo cho ta giá trị tần số nhiều thu được xấp xỉ 12000 Hz. Từ phương trình (11) ta tính được độ rộng phổ thực $\Delta\nu$ có giá trị xấp xỉ 19 kHz.



Hình 6. Phổ công suất nhiều tần số của laser bán dẫn DFB phát xạ vùng 780 nm, đo ở công suất phát xạ 250 mW tại nhiệt độ 25°C. Giá trị tần số nhiều của tín hiệu beatnote xấp xỉ 12000 Hz.

5. Kết luận

Bằng phương pháp đo độ rộng phổ thông qua đo mật độ phổ công suất nhiều tần số, độ rộng vạch phổ của laser siêu hẹp đã được khảo sát. Laser bán dẫn DFB 780 nm có công suất cực đại là 303 mW, phát bức xạ đơn mode trong vùng 780 nm. Độ rộng vạch phổ thực của laser tại công suất 250 mW thu được là 19 kHz. Phương pháp này khắc phục được sự phụ thuộc vào thời gian trễ của tín hiệu so với phương pháp đo phổ năng lượng phụ thuộc tần số và hoàn toàn có thể xác định được độ rộng vạch phổ của laser tới cỡ hàng chục Hz.

Lời cảm ơn

Tác giả cảm ơn phòng thí nghiệm Joint Lab Laser Metrology, Viện Ferdinand Braun Institut, CHLB Đức đã giúp đỡ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Camparo, The rubidium atomic clock and basic research, Phys. Today 60, 11 (2007), 33-39.
- [2] A. Klehr, H. Wenzel, O. Brox, F. Bugge, G. Erbert, T-P. Nguyen and G. Tränkle, High power DFB lasers for D1 and D2 rubidium absorption spectroscopy and

- atomic clocks, Proc. of SPIE, Vol. 7230, (2009), 72301I-1-72301I-10.
- [3] M. Maiwald, G. Erbert, A. Klehr, H-D. Kronfeldt, H. Schmidt, B. Sumpf, and G. Traenkle, Rapid shifted excitation Raman difference spectroscopy with a distributed feedback diode laser emitting at 785 nm, Appl. Phys. B, 85, (2006), 509-512.
- [4] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, E. A. Cornell, Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor, Science, New Series, 269, No. 5221 (1995), 198-201.
- [5] O. Carraz, F. Lienhart, R. Charrière, M. Cadoret, N. Zahzam, Y. Bidet, and A. Bresson, "Compact and robust laser system for onboard atom interferometry", Appl. Phys. B, 97(2), (2009), 405-411.
- [6] D. Derickson, "Fiber Optics Test and Measurement", Prentice-Hall, Inc., (1998).
- [7] G. Genty, "Supercontinuum generation in microstructured fibers and novel optical measurement techniques", PhD Thesis, Helsinki University of Technology, Espoo (2004).
- [8] T. Okoshi, K. Kikuchi, and A. Nakayama, "Novel method for High Resolution Measurement of Laser Output Spectrum", Electron Lett., 16, (1980), 630-631.
- [9] M. A. Linne, "Spectroscopic Measurement An Introduction to the Fundamentals", Elsevier Science Ltd. (2002).
- [10] L. B. Mercer, "1/f Frequency Noise Effects on Self-Heterodyne Linewidth Measurements", IEEE J. Lightwave Technol. 9(4), (1991), 485-492.
- [11] M. Schiemangk, S. Spießberger, A. Wicht, G. Erbert, G. Tränkle, and A. Peters, "Accurate frequency noise measurement of free-running lasers," Appl. Opt. 53, (2014), 7138-1743.