

09

## **Усиление автодинного сигнала в бистабильном вертикально-излучающем лазере с использованием вибрационного резонанса**

© В.Н. Чижевский

Институт физики им. Б.И. Степанова, Минск, Беларусь  
E-mail: vnc@dragon.bas-net.by

Поступило в Редакцию 1 августа 2017 г.

Впервые экспериментально продемонстрировано, что вибрационный резонанс в поляризационно-бистабильном лазере с вертикальным резонатором может быть использован для увеличения отклика лазера при автодинном детектировании микровибраций от отражающих поверхностей. При этом достигнуто усиление сигналов более чем в 25 раз. Исследовано влияние асимметрии бистабильного потенциала на эффективность детектирования микровибраций.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45429.16996

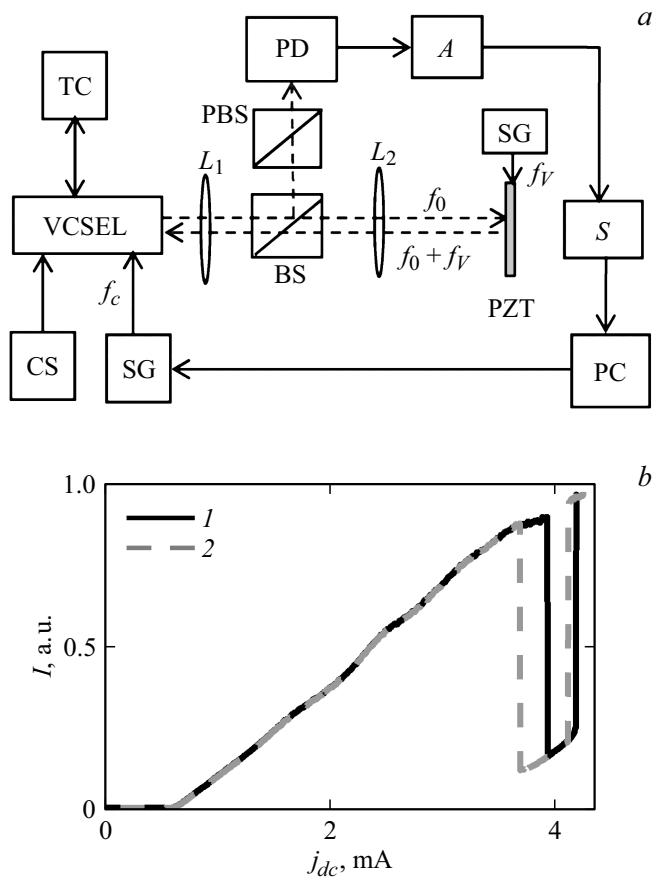
Автодинная интерферометрия, или интерферометрия оптической обратной связи, — бесконтактный метод, основанный на регистрации флуктуаций выходных параметров лазера, индуцированных за счет самоинжекции в резонатор лазера рассеянной или отраженной от исследуемого объекта компоненты [1–4]. Этот метод показал высокую эффективность при измерении перемещений, скоростей, вибраций, направления движения объектов в различных областях науки техники [1–4]. Подобный подход детектирования дает возможность создания на основе полупроводниковых лазеров измерительных датчиков, обладающих высокой чувствительностью к отраженному сигналу, невысокой стоимостью и компактностью.

Ранее в [5,6] было экспериментально показано, что чувствительность лазерного автодинного измерителя скорости, основанного на эффекте Доплера, может быть увеличена за счет поляризационных переключений в бистабильном вертикально-излучающем лазере (ВИЛ), индуцированных рассеянным обратно в резонатор лазера излучением от вращающегося диска. При этом было достигнуто усиление отклика

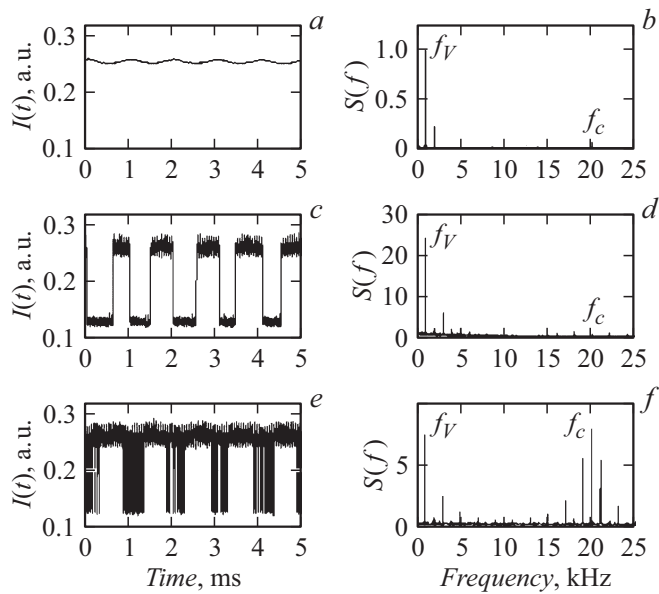
на 10 dB. Однако для использования этого эффекта необходимо, чтобы амплитуда биений, обусловленная рассеянной компонентой, была больше порога переключений в бистабильном лазере, что ограничивает применимость этого подхода.

В настоящей работе для управления переключениями в бистабильном лазере предлагается использовать явление вибрационного резонанса, впервые предложенного в работе [7] и экспериментально обнаруженного в ВИЛ [8] и ряде других нелинейных систем [9]. В частности, было показано, что добавление высокочастотного сигнала с оптимальным значением амплитуды позволяет получить достаточно большое усиление низкочастотных сигналов в бистабильном ВИЛ [8]. Было также экспериментально продемонстрировано, что вибрационный резонанс может использоваться для улучшения детектирования слабых периодических и апериодических бинарных сигналов [10,11], в том числе оптических [12]. Механизм, лежащий в основе усиления, связан с усилением сигналов вблизи бифуркации перехода из бистабильности в моностабильность, управляемой дополнительной модуляцией параметров [13]. Целью настоящей работы является разработка метода увеличения чувствительности автодинных измерений микровибраций с амплитудами колебаний меньше  $\lambda/2$  (где  $\lambda = 860 \text{ nm}$  — длина волны генерации бистабильного ВИЛ) на основе использования вибрационного резонанса.

Предложенный метод увеличения чувствительности автодинного виброметра был реализован на установке, схематически представленной на рис. 1, а. Использовался одномодовый ВИЛ производства фирмы Finisar (HFE4093-332), генерирующий в области 860 nm. Температура лазерного диода стабилизировалась с помощью термоконтроллера с точностью не хуже  $0.01^\circ\text{C}$ . Коллимированное с помощью линзы  $L_1$  с антиотражающим покрытием излучение лазера разделялось на светоделительном кубе BS на два пучка, один из которых с помощью линзы  $L_2$  фокусировался на объект, закрепленный на пьезокорректоре PZT. Фокусное расстояние линз  $L_1$  и  $L_2$  было 8 и 50 mm соответственно. В качестве объекта использовалось зеркало с коэффициентом отражения 20%. Расстояние от лазера до PZT составляло 15 cm. Излучение лазера ослаблялось так, чтобы отраженное от объекта модулированное излучение не вызывало переключений между поляризационными состояниями при отсутствии токовой модуляции. Другой пучок лазерного излучения через поляризатор PBS направлялся на фотодиод PD для регистрации временной динамики на выделенной поляризации. Сигнал с



**Рис. 1.** *a* — схема экспериментальной установки: VCSEL — лазер с вертикальным резонатором, TC — термоконтроллер; CS — источник питания, SG — генератор сигналов;  $L_1$  и  $L_2$  — линзы, PZT — пьезокорректор КП-1, BS — делитель пучка, PBS — поляризационный делитель; PD — фотодиод; A — усилитель; S — цифровой USB-осциллограф; PC — компьютер. *b* — зависимость интенсивности генерации ВИЛ на выделенной поляризации от величины постоянного тока накачки  $j_{dc}$  при последовательном увеличении (1) и уменьшении (2)  $j_{dc}$ .



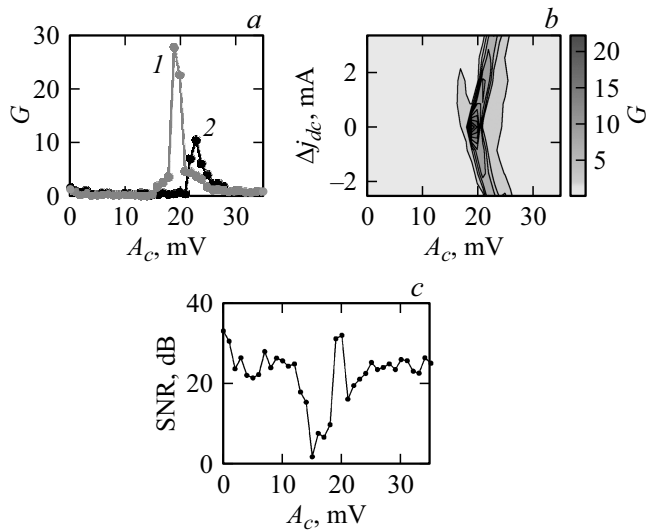
**Рис. 2.** *a* — автодинный сигнал при отсутствии управляющей токовой модуляции ( $A_c = 0$ ); *b* — его спектр  $S(f)$ ; *c* и *e* — автодинные сигналы при оптимальном значении амплитуды токовой модуляции  $A_c$  для симметричной (*c*) и асимметричной (*e*) конфигураций бистабильного потенциала; *d* и *f* — соответствующие спектры  $S(f)$ .

фотодиода подавался на усилитель  $A$  и регистрировался цифровым USB осциллографом (с частотой выборок до 50 MHz). К непрерывному току накачки  $j_{dc}$  от генератора сигналов добавлялся периодический сигнал с частотой  $f_c = 20$  kHz и различными амплитудами  $A_c$ . Амплитуда  $A_c$  является здесь управляющим параметром. Для модуляции длины резонатора оптической обратной связи (ООС) на пьезокорректор от генератора сигналов подавалось синусоидальное напряжение с частотой  $f_V = 1$  kHz с различными амплитудами  $U$ .

Была экспериментально исследована зависимость отклика лазера на выделенной поляризации от тока смещения  $j_{dc}$ . При высоких значениях  $j_{dc}$  было найдено гистерезисное поведение интенсивности генерации при последовательном увеличении и уменьшении  $j_{dc}$ . На

рис. 1, *b* представлены результаты этих измерений, демонстрирующие наличие двух зон поляризационной бистабильности в ВИЛ с разной шириной гистерезиса. При этом при фиксированном  $j_{dc}$  и постоянной величине ООС при работе лазера в бистабильном режиме никаких спонтанных переключений, вызванных внутренними шумами лазера, не наблюдалось. В дальнейшем все эксперименты проводились при токах накачки, соответствующей первой зоне бистабильности.

Известно, что излучение, отраженное обратно в резонатор лазера от вибрирующего объекта, создает биения на частоте вибраций, модулируя таким образом выходную мощность лазера. При этом характер модуляции выходного излучения зависит как от амплитуды вибраций, так и от силы оптической обратной связи [1,2]. Были исследованы временные зависимости интенсивности генерации ВИЛ на выделенной поляризации при различных значениях напряжения  $U$  на пьезокорректоре с частотой  $f_V = 1 \text{ kHz}$  при умеренной величине ООС. При значении  $U = 1 \text{ V}$  наблюдались колебания интенсивности генерации лазера, близкие к гармоническим. Увеличение напряжения  $U$  на пьезокорректоре приводило к появлению скачков в интенсивности генерации, обусловленных последовательным изменением длины внешнего резонатора на половину длины волны излучения. Дальнейшие исследования проводились при величине напряжения на пьезокорректоре  $U = 1 \text{ V}$ , что соответствовало амплитуде колебаний зеркала меньше  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  — длина волны генерации ВИЛ. На рис. 2, *a* представлен зарегистрированный автодинный сигнал  $I(t)$  в области поляризационной бистабильности при отсутствии дополнительной токовой модуляции. Соответствующий спектр показан на рис. 2, *b*, из которого видно, что сигнал  $I(t)$  достаточно близок к гармоническому сигналу. При добавлении токовой модуляции на частоте управляющего сигнала  $f_c = 20 \text{ kHz}$  с оптимальным значением амплитуды наблюдаются четкие переключения между поляризационными состояниями на частоте микровибраций  $f_V$  (рис. 2, *c*). При этом временная форма автодинного сигнала преобразуется в периодическую последовательность прямоугольных импульсов, спектр сигнала показан на рис. 2, *d*. Представленный на рис. 2, *c* случай соответствует току накачки, при котором реализуется симметричная конфигурация бистабильного потенциала, связанная с поляризационной бистабильностью. В эксперименте это значение тока накачки может быть найдено как значение, соответствующее минимальному порогу переключения при периодической токовой модуляции. Небольшое изменение постоянного тока накачки приводит к асимметрии бистабильного потенциала [10–12],



**Рис. 3.** *a* — зависимость коэффициента усиления  $G$  от  $A_c$  при  $j_{dc} \sim 3.845$  (1) и  $\sim 3.848$  mA (2), *b* — контурный график зависимости величины  $G$  от  $A_c$  и  $\Delta j_{dc}$ , *c* — отношение сигнал/шум (SNR) в зависимости от  $A_c$  для случая  $\Delta j_{dc} = 0$ .

что проявляется во временной динамике лазера (рис. 2, *e*). В асимметричном случае отклик лазера состоит из пачек импульсов на частоте  $f_c$ , следующих с частотой микровибраций  $f_V$ , что также проявляется в спектре сигнала (рис. 2, *f*).

Для количественной оценки улучшения детектирования введем коэффициент усиления  $G$ , определяемый как  $G = R(f_N)/R_0(f_N)$ , где  $R_0(f_N)$  и  $R(f_N)$  — амплитуды пиков в спектре автодинного сигнала на частоте микровибраций  $f_N$  при отсутствии и наличии управляющей токовой модуляции соответственно. На рис. 3, *a* представлена зависимость коэффициента усиления  $G$  для сигнала на частоте вибраций  $f_V$  от амплитуды дополнительной модуляции тока накачки с частотой  $f_c = 20$  kHz для двух значений  $j_{dc}$ . Обе кривые на рис. 3, *a* проходят через максимум в зависимости от  $A_c$ , что характерно для явления вибрационного резонанса в ВИЛ [5,7]. Более высокое пиковое значение на кривой 1 (рис. 3, *a*) соответствует симметричному случаю бистабильного потенциала ВИЛ. В частности, видно, что в этом случае увеличе-

ние отклика лазера составляет более 25 раз. На рис. 3, *b* представлен контурный график зависимости величины  $G$  от амплитуды управляющего сигнала  $A_c$  и асимметрии бистабильного потенциала  $\Delta j_{dc}$  ( $\Delta j_{dc} = 0$  соответствует симметричной конфигурации бистабильного потенциала). Видно, что максимальные значения  $G$  достигаются в узком диапазоне значений  $j_{dc}$  и  $A_c$ , что на практике требует высокой степени стабилизации тока накачки и температуры лазерного диода. Следует отметить, что добавление токовой модуляции не приводит к заметному ухудшению отношения сигнал–шум (SNR) на частоте вибраций  $f_V$  при оптимальном значении амплитуды управляющего сигнала  $A_c$  (рис. 3, *c*).

Таким образом, впервые экспериментально продемонстрировано, что чувствительность автодинного виброметра может быть существенно увеличена при использовании вибрационного резонанса в бистабильном лазере с вертикальным резонатором. Подобный подход может быть также использован для увеличения чувствительности в доплеровском измерителе скоростей на основе бистабильного ВИЛ.

## Список литературы

- [1] Donati S. // Laser Photon. Rev. 2012. V. 6. P. 393–417.
- [2] Taimre T., Nikolic M., Bertling K. et al. // Adv. Opt. Photon. 2015. V. 7. P. 570–631.
- [3] Perchoux J., Quot A., Atashkhouei R. et al. // Sensors. 2016. V. 16. P. 694–719.
- [4] Li J., Niu H., Niu Y. // Opt. Eng. 2017. V. 56. P. 050901 (1–20).
- [5] Porta P.A., Curtin D.P., McInerney G.J. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2002. V. 14. P. 1719–1721.
- [6] Albert J., Soriano M.C., Veretennicoff I. et al. // IEEE J. Selected Top. Quantum Electron. 2004. V. 10. P. 1006–1012.
- [7] Landa P.S., McClintock P.V.E. // J. Phys. A: Math. Gen. 2000. V. 33. P. L433–438.
- [8] Chizhevsky V.N., Smeu E., Giacomelli G. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 220602 (1–4).
- [9] Rajasekar S., Sanjuan M.A.F. Nonlinear resonances. Springer Ser. in Synergetics. Springer Int. Publ., 2016. 409 p.
- [10] Chizhevsky V.N., Giacomelli G. // Phys. Rev. A. 2005. V. 71. P. 011801(R) (1–4).
- [11] Chizhevsky V.N., Giacomelli G. // Phys. Rev. E. 2008. V. 77. P. 051126 (1–7).
- [12] Chizhevsky V.N. // Opt. Lett. 2012. V. 37. P. 4386–4388.
- [13] Chizhevsky V.N. // Int. J. Bifurcat. Chaos. 2008. V. 18. P. 1767–1773.