

УДК 535.343.4

СРАВНЕНИЕ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ (VCSEL) И ПЛАНАРНЫМ ФАБРИ-ПЕРО РЕЗОНАТОРАМИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СЛАБОГО ПОГЛОЩЕНИЯ NO_2 В ОБЛАСТИ 660 нм

В. Н. Очкин, М. В. Спиридонов, С. Н. Цхай

Проведено экспериментальное сравнение чувствительности спектрометров на основе VCSEL и планарных диодных лазеров при измерении малых концентраций двуокиси азота в видимой области спектра. При обработке спектров и вычислении концентрации NO_2 применялся корреляционный метод линейной регрессии. Показано, что при регистрации сложных спектров поглощения с сильным переналожением спектральных линий VCSEL могут обеспечить чувствительность на порядок лучше, чем планарные лазеры. При использовании VCSEL получена чувствительность детектирования NO_2 в области 660 нм около $0.3 \text{ ppt} \cdot \text{м}$.

1. *Введение.* Спектрометры на основе диодных лазеров (ДЛ) являются одними из наиболее чувствительных приборов для измерения малых количеств газовых примесей. Высокая чувствительность обусловлена низким уровнем шумов излучения ДЛ, высоким спектральным разрешением и возможностью быстрой перестройки длины волны. Этим, в частности, обусловлено растущее количество работ по применению диодной лазерной спектроскопии (ДЛС) в аналитике, детектированию примесей и др. (см., напр., [1, 2]).

Развитие лазерной техники привело к созданию ряда удобных в применении диодных лазеров в различных спектральных областях. В первую очередь это лазеры, работающие при комнатной температуре. К одним из таких типов лазеров, активно развивающихся в последнее время, относятся лазеры с вертикальным резонатором, излучающие с поверхности (VCSEL). Эти лазеры имеют оптическую длину резонатора

порядка нескольких микрон и генерируют излучение поперек p - n перехода, в отличие от традиционных планарных лазеров, излучающих в плоскости p - n перехода (ПФП). VCSEL лазеры характеризуются широкой областью непрерывной перестройки частоты излучения ($> 30 \text{ см}^{-1}$), высокой скоростью перестройки частоты, хорошим качеством пучка с относительно малой расходимостью, слабой зависимостью длины волны излучения от температуры и низким значением рабочего тока ($\sim 10 \text{ мА}$). И, хотя в качестве недостатка можно отметить малую выходную мощность излучения (не более нескольких мВт), они оказываются удобными приборами для целей телекоммуникации. В то же время сопоставление возможностей применения VCSEL и ПФП лазеров в задачах с регистрацией малых поглощений вызывает неоднозначные суждения.

Прямых сопоставлений чувствительности детектирования молекул VCSEL и ПФП лазерами не проводилось. Можно отметить работу [3], где сравнивались возможности VCSEL и лазеров с распределенной обратной связью (DFB) при измерении слабого поглощения кислорода в области 0.76 мкм . Области токовой непрерывной перестройки частоты DFB лазеров аналогичны ПФП лазерам, и с этой точки зрения их аналитические возможности сопоставимы. По оценке работы [3] VCSEL проигрывает по сравнению с DFB лазером в чувствительности два порядка. Однако сами авторы признают, что это может быть связано в большой степени с особенностью установки, оптимизированной по параметрам для работы с DFB лазерами, – установка имела хорошую температурную стабилизацию лазера, но стабильность источника тока ($\sim 0.05 \text{ мА}$) была явно недостаточна для VCSEL. С другой стороны, возможность повышения чувствительности ДЛС за счет расширения полосы перестройки частоты вызывает вопросы из-за возможного увеличения уровня шумов [4]. Число работ по применениям VCSEL в ДЛС постоянно растет, что не в последнюю очередь связано с относительно низкой ценой этих лазеров по сравнению с лазерами DFB.

В данной работе проводится экспериментальное сравнение чувствительности приборов, использующих традиционные дешевые лазеры ПФП, с приборами на основе VCSEL при детектировании молекул, имеющих сложный спектр поглощения с сильным переналожением спектральных линий. К таким молекулам относится двуокись азота (NO_2), имеющая интенсивный спектр поглощения в видимой области. При этом широкая область непрерывной перестройки VCSEL может играть решающую роль в повышении чувствительности прибора при часто используемом корреляционном методе обработки спектров поглощения.

2. *Экспериментальная техника и методика измерений.* В эксперименте использовались два лазера, работающие в области 660 нм (15100 см^{-1}). Первый – обычный ФП лазер фирмы Toshiba с выходной мощностью 3 мВт и областями непрерывной перестройки частоты $1 - 2 \text{ см}^{-1}$. Второй – VCSEL фирмы Finiscomms с выходной мощностью 1 мВт и непрерывной перестройкой частоты до 15 см^{-1} .

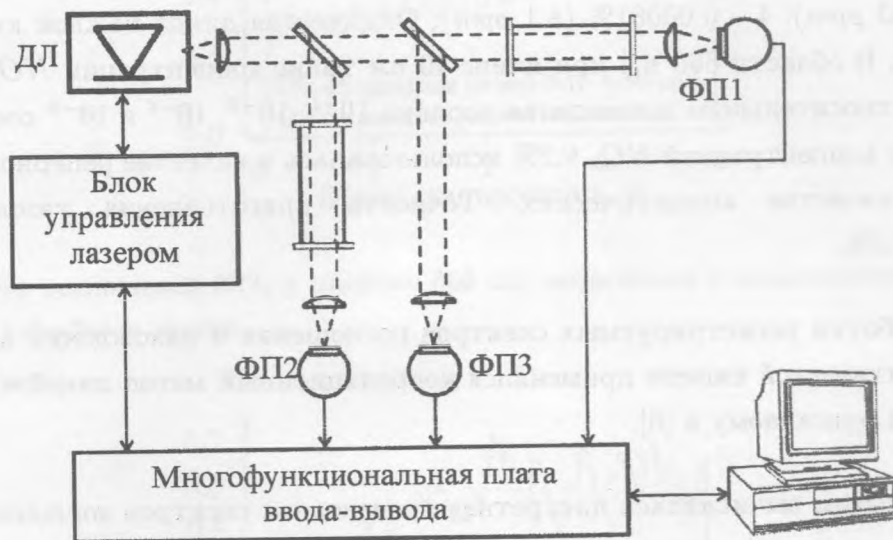


Рис. 1. *Схема экспериментальной установки (пояснения в тексте).*

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Диодный лазер (ДЛ) установлен на термоэлектрическом элементе Пельтье, снабжен терморезистором и смонтирован в герметичном корпусе. Стабилизация температуры лазера была реализована по сигналу терморезистора программным образом, что обеспечивало стабильность температуры на уровне $2 \cdot 10^{-4} \text{ К}$. Питание лазеров осуществлялось импульсами тока трапецидальной формы с наклонной вершиной длительностью 5 мс и частотой повторения 120 Гц . Величина тока инжекции составляла от 30 до 50 мА для ФП лазера и от 3 до 6 мА для VCSEL лазера. Сканирование излучения лазера по частоте обеспечивалось изменением тока в импульсе. Спектрометр состоял из трех оптических каналов: аналитический канал с фотоприемником ФП1; реперный канал (ФП2); канал регистрации базовой линии (падающей интенсивности) (ФП3). В качестве фотоприемников использовались кремниевые фотодиоды S1336 фирмы Hamamatsu. Сигналы с фотоприемников регистрировались многофункциональной платой ввода-вывода NI-PCI-6120 фирмы National Instruments. Программа для управления лазерами и для регистрации сигналов

была разработана с использованием системы LabView 7.0. В данной схеме оптическая развязка не использовалась, однако отсутствие интерференции на уровне не более 10^{-4} контролировалось.

Были приготовлены 4 кюветы с двуокисью азота, разбавленной воздухом до атмосферного давления, содержащие различные концентрации NO_2 : 1 – 9.2%; 2 – 0.97%; 3 – 0.0083% (83 ppm); 4 – 0.00081% (8.1 ppm). Оптическая длина каждой кюветы составляла 40 см. В области 660 нм при длине 40 см такие концентрации NO_2 приводят к величинам относительного поглощения порядка 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-4} и 10^{-5} соответственно [5]. Кювета с концентрацией NO_2 9.2% использовалась в качестве реперной, остальные три – в качестве аналитических. Точность приготовления газовых смесей составляла 3%.

Для обработки регистрируемых спектров поглощения и нахождения концентрации NO_2 в аналитической кювете применялся корреляционный метод линейной регрессии, аналогичный описанному в [6].

Первым шагом вычислялась дискретная производная спектров поглощения в реперном и аналитическом каналах путем вычитания массива самого из себя, но со сдвигом на определенное количество точек. В такой процедуре важен выбор оптимального сдвига, величина которого должна превышать типичные размеры случайных шумовых пиков и быть меньше полуширины спектральной линии. Таким образом частично сглаживаются высокочастотные шумы в регистрируемом спектре. Другими словами, величина оптимального сдвига зависит от характера спектра поглощения, и в наших экспериментах составляла 40 точек для VCSEL лазера и 300 точек для ФП лазера, что соответствовало ~ 0.2 полуширины линии поглощения. На втором шаге строился график, каждая точка которого имела x -координату, равную значению точки массива данных реперного канала, и y -координату, равную значению соответствующей точки массива данных аналитического канала. При отсутствии шумов и ошибок все точки этого графика должны лежать на прямой линии $y = kx$, где k – отношение поглощений NO_2 в аналитической и реперной кюветах или отношение соответствующих концентраций NO_2 . Наличие шумов и нестабильность лазера приводят к разбросу точек вокруг этой прямой, однако подобная процедура позволяет надежно определять наклон прямой k даже при отношении сигнал/шум < 1 .

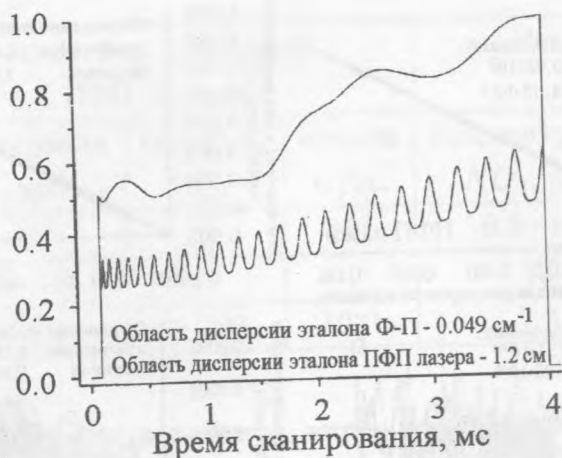


Рис. 2. Спектр поглощения NO_2 в области 660 нм, записанный с использованием традиционного (ПФП) диодного лазера.



Рис. 3. Спектр поглощения NO_2 в области 660 нм, записанный с использованием VCSEL диодного лазера.

3. *Результаты и обсуждение.* На рисунках 2 и 3 приведены спектры поглощения NO_2 в реперной кювете, записанные с использованием ПФП и VCSEL лазеров соответственно. Для определения относительной шкалы перестройки частоты на обоих рисунках приведен спектр пропускания эталонов Фабри-Перо с областями свободной дисперсии 0.049 (рис. 2) и 0.082 см^{-1} (рис. 3). Из рисунков видно, что VCSEL лазер обеспечивает почти в 8 раз большую непрерывную перестройку частоты, чем ПФП лазер, причем шкала частотной перестройки у VCSEL лазера заметно более линейная.

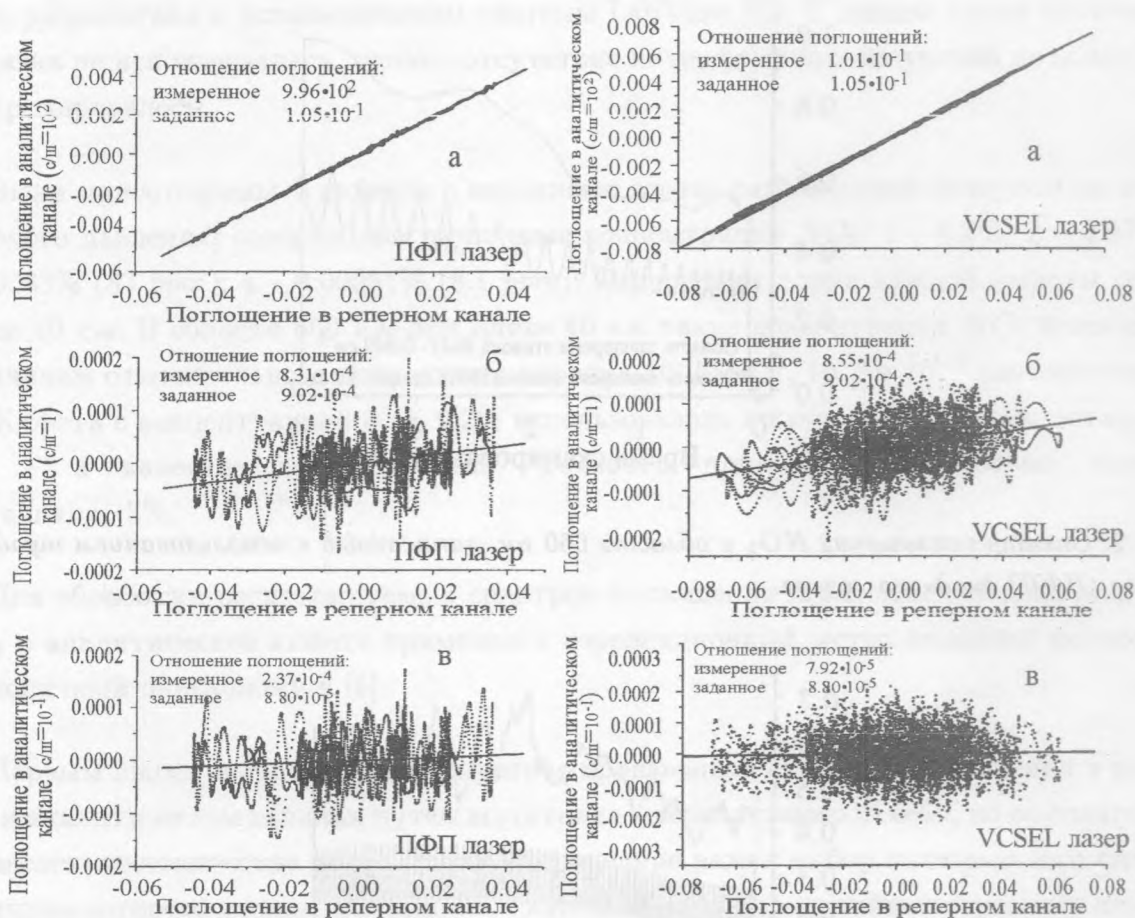


Рис. 4. Применение корреляционного метода линейной регрессии для обработки спектров поглощения NO_2 , записанных при помощи ПФП (слева) и VCSEL (справа) диодных лазеров. Приведены результаты для трех концентраций NO_2 : а – 0.97%; б – 0.0083%; в – 0.00081%.

На рисунке 4 приведены результаты обработки спектров поглощения NO_2 в трех аналитических кюветах по корреляционному методу линейной регрессии с использованием спектров в реперной кювете для ПФП и VCSEL лазеров соответственно. Результаты определения концентрации NO_2 при помощи этой методики приведены в таблице.

Приведенные в таблице значения концентрации определялись по наклону прямой, полученной методом линейной аппроксимации данных, приведенных на рис. 4.

Т а б л и ц а

Заданная концентрация NO_2 , ppm	Результаты измерений с ПФП лазером			Результаты измерений с VCSEL лазером		
	Концентрация NO_2 , ppm	Ошибка, %	отнош. с./ш.	Концентрация NO_2 , ppm	Ошибка, %	отнош. с./ш.
$9.7 \cdot 10^3$	$9.2 \cdot 10^3$	5	10^2	$9.3 \cdot 10^3$	4	10^2
83	75	10	1	79	5	1
8.1	22	> 100	10^{-1}	7.3	10	10^{-1}

Из результатов, показанных в таблице, видно, что при регистрации больших поглощений (первая строка таблицы, относительное поглощение 10^{-2} , отношение сигнал/шум 10^2) VCSEL лазер не дает преимуществ по сравнению с ПФП лазером. Ошибка определения концентрации NO_2 составляет 4–5%, причем существенная часть этой ошибки может быть связана с неточностью приготовления газовой смеси. При относительном поглощении 10^{-4} (вторая строка таблицы, отношение сигнал/шум 1) преимущества VCSEL лазера уже заметны, поскольку он обеспечивает вдвое меньшую ошибку измерения концентрации. При измерении очень слабого поглощения 10^{-5} (третья строка таблицы, отношение сигнал/шум 10^{-1}) преимущества VCSEL лазера очевидны, поскольку он обеспечивает вполне удовлетворительную ошибку измерения концентрации в 10%, в то время как измерения при помощи ПФП лазера приводят к ошибке > 100%.

4. Выводы.

Проведены измерения и анализ с помощью ДЛС спектров поглощения молекул NO_2 известной концентрации в видимой области спектра (660 нм) с применением лазеров ПФП и VCSEL. Концентрация NO_2 варьировалась от 0.0008% до 0.97% в атмосфере воздуха. Обработка спектров проводилась корреляционным методом линейной регрессии, где в качестве опорного спектра использовались измерения при повышенной концентрации NO_2 – 9.2%.

Применение VCSEL лазеров для регистрации слабых линий поглощения в условиях сложного спектра с сильным переналожением линий позволяет примерно на порядок улучшить чувствительность газоанализаторов по сравнению с приборами на основе обычных ПФП диодных лазеров. На наш взгляд это достигается благодаря ряду причин. В экспериментах с ПФП лазером ширина спектральной линии поглощения имеет

величину того же порядка, что и область непрерывной перестройки частоты лазера. В этом случае характерное время нестабильности базовой линии может быть сравнимо с временем сканирования спектральной линии и, в описанной выше процедуре математической обработки сигнала, приводит к ложному сигналу. Широкая область непрерывной перестройки частоты VCSEL значительно снижает влияние нестабильности базовой линии лазера на результаты измерений. Наличие большого числа спектральных линий в широком спектральном интервале как в измеряемом, так и опорном спектрах, может приводить к увеличению количества информативных точек на корреляционной прямой и, следовательно, к более точному определению ее наклона при линейной аппроксимации. При этом, конечно, решающую роль будет играть наличие сильных линий поглощения в измеряемом спектральном интервале. В случае сравнительно простого спектра с изолированными линиями применение VCSEL не будет давать такого преимущества, что и было обнаружено в [3, 4]. По-видимому, положительную роль играет также однородность пучка в VCSEL, но в рамках данной работы такой анализ не проводился.

При использовании VCSEL в области 660 нм получена чувствительность детектирования NO_2 около 0.3 ppm·м. Следует отметить, что область 660 нм не самая удачная для достижения высокой чувствительности детектирования NO_2 , поскольку в этой области наблюдается локальный минимум коэффициента поглощения. Применение лазеров, работающих в области 645–650 нм, по оценкам позволило бы улучшить чувствительность еще в 10–15 раз.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 04-02-08192, программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Оптическая спектроскопия и стандарты частоты”, ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники” (тема 01.40.01.08.02).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Frish M. B., Wainner R. T., Green B. D., et. al. “Progress in reducing size and cost of trace gas analyzers based on tunable diode laser absorption spectroscopy” in: Proc. SPIE Vol. 5586, Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies II /Eds: Tuan Vo-Dinh, Gunter Gauglitz, Robert A. Lieberman, 2004, p. 76.
- [2] N a d e z h d i n s k i i A. I. “Optimization of Trace molecule detection using tunable diode lasers” in: 4th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS-2003), Zermatt, Switzerland. Book of abstracts, (2003), p. 79.

- [3] Weldon V., O'Gorman J., Perez-Camacho J. J., et. al. Infrared Phys.&Technol., **38**, 325 (1997).
- [4] Wang J., Sanders S. T., Jeffries J. B., Hanson R. K. Appl. Phys. B: Laser and Optics, **72**, 865 (2001).
- [5] Vandaele A. C., Hermans C., Simon P. C., et. al. J. Atm. Chem., **25**, 289 (1996).
- [6] Kosterev A. A., Curl R. F., Tittel F. K., et. al. Applied Optics LP, **39**, 4425 (2000).

Поступила в редакцию 14 марта 2005 г.

После переработки 15 июля 2005 г.