

ФИЗИКА

УДК 535

**ПОЛУЧЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 514.5...515 нм
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СПЕКТРОСКОПИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО
ЙОДА***

М.Н. СКВОРЦОВ¹, В.И. ВИШНЯКОВ²

¹ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13/3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН. E-mail: skv@laser.nsc.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистр физики, аспирант кафедры лазерных систем. E-mail: split7fire@yandex.ru

В статье рассмотрено современное состояние проблем лазерной спектроскопии, в том числе использование паров молекулярного йода для целей построения стандартов частоты. Разработан генератор второй оптической гармоники от перестраиваемого волоконного иттербиевого лазера на основе внешнего резонатора с кристаллом LBO (LiB_3O_5 – триборат лития) для последующего использования в экспериментах по спектроскопии молекулярного йода. Особенностью собранного генератора второй оптической гармоники является использование перестраиваемого волоконного иттербиевого лазера с распределенной обратной связью. Перестройка по длине волны осуществлялась в диапазоне 1029...1030 нм посредством изменения температуры резонатора лазера. В основе рассматриваемого генератора второй гармоники лежит двухзеркальный резонатор и кристалл LBO, расположенный в перетяжке резонатора удвоителя. Для целей стабилизации лазерного излучения использовалась система автоподстройки частоты (АПЧ). Для повышения стабильности частоты лазера использовался эталон Фабри–Перо. Для стабилизации частоты удвоителя была использована схема Паунда–Дривера–Холла. В ходе экспериментов были измерены шумовые характеристики излучения второй гармоники. Чтобы учесть вклад, вносимый самим фотоприемником, был измерен спектр шумов используемого фотоприемника. Полученные результаты сравнивались с шумовыми характеристиками, полученными от лампы накаливания с тем же уровнем засветки. Построен график зависимости шумовых компонент от частоты. Исследована зависимость выходной мощности излучения второй гармоники от длины волны излучения в диапазоне 514.5...515 нм. Построен график зависимости величины выходной мощности второй гармоники от длины волны излучения. В результате проделанной работы получено до 13 мВт излучения во второй гармонике с возможностью перестройки длины волны генератора.

* Статья получена 17 февраля 2015 г.

Ключевые слова: генерация второй гармоники, двухзеркальный резонатор, LBO, спектроскопия, молекулярный йод, эталон Фабри–Перо, техника Паунда–Драйвера–Холла, волоконный лазер

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-116-127

ВВЕДЕНИЕ

Методами спектроскопии исследуют уровни энергии и структуру атомов, молекул и образованных из них макроскопических систем, изучают квантовые переходы между уровнями энергии, взаимодействия атомов и молекул, а также макроскопические характеристики объектов, такие как температура, плотность, скорость движения и т. д. Важнейшие области применения спектроскопии: спектральный анализ, астрофизика, исследование свойств газов, плазмы, жидкостей и твердых тел.

Для спектроскопических исследований необходим источник когерентного лазерного излучения. Генерирование оптических гармоник, в свою очередь, необходимо для получения излучения в спектре, отличном от излучения накачки. Например, вторая гармоника Nd:YAG лазера имеет длину волны 532 нм и широко используется в спектроскопии, медицине, голографии, а также при создании стандартов частоты [1]. Стабильные по частоте лазеры широко используются не только в научных исследованиях, но и в технике как эталонные источники света для интерферометрических измерений длины.

Одной из самых важных задач спектроскопии сверхвысокого разрешения является создание стабильных по частоте лазерных источников излучения с предельно узкой линией генерации – ее основного инструмента. Создание лазеров с долговременной стабильностью частоты не хуже, чем у мазеров, и решение проблемы передачи частотных характеристик стабильных лазеров в микроволновый диапазон сделало возможным создание оптических часов, т. е. использование периода высокостабильных оптических колебаний в качестве шкалы времени [2].

Целью нашей работы было создание источника лазерного излучения на длине волны 515 нм с возможностью перестройки. Задачей данной работы было собрать генератор второй гармоники на основе волоконного иттербиевого лазера и внешнего резонатора с нелинейным кристаллом LBO (триборат лития). Отличительной особенностью нашей установки является использование волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1030 нм. Данный лазер имеет возможность перестраиваться по длине волны в диапазоне 1029...1030 нм. В сравнении с аргоновым и титан-сапфировым лазерами волоконный лазер значительно проще в эксплуатации, дешевле и компактнее.

Молекулярный йод является одним из наиболее интересных объектов для лазерной прецизионной спектроскопии в видимом диапазоне длин волн. Интерес к молекулярному йоду объясняется большим количеством линий поглощения при относительно малой их естественной ширине практически во всем видимом диапазоне длин волн [3–6]. Шесть из восьми лазеров, рекомендованных Международным комитетом по мерам и весам, используют в качестве реперов частоты резонансы насыщенного поглощения в молекулярном йоде [7]. Линии поглощения молекулярного йода перекрывают область спектра от 500 до 650 нм. В области 500...650 нм имеется около 10^4 сильных линий поглощения [8]. Оптические переходы сверхтонкого разрешения в молекулярном йоде обычно представляют стабильные опоры для прецизионной спектроскопии. Узкие сверхтонкие компоненты широко применяются при стабилизации частоты лазера. Например, была создана система He-Ne/I₂ при помощи внутрирезонаторного насыщающего поглощения на длине волны 633 нм [9]. Существуют и другие системы, работающие на длинах волн 640, 612, 576 и 543 нм [10]. Большинство из них рекомендованы для реализации единицы метра [7]. На данный момент в мире широко распространены установки, использующие переходы в парах йода вблизи 532 нм для целей стабилизации частоты [11]. Использование переходов на длинах волн ниже 532 нм позволит увеличить стабильность частотных стандартов [12]. Наличие узких и высокоинтенсивных резонансов в молекуле йода в диапазоне 515 нм представляет научный и практический интерес с точки зрения использования в стандартах частоты в качестве частотного репера. Диапазон 501...523 нм содержит достаточно много узких линий, которые могут быть использованы в роли частотных опор [12]. Ширина линий на этих длинах волн может достигать 100...200 кГц (полная ширина на полувысоте). Излучение в диапазоне 514...515 нм также содержит достаточно много узких линий, которые могут быть использованы в роли частотных опор [13]. Диапазон 514...515 нм недоступим для удвоенных по частоте Nd:YAG лазеров, однако может быть перекрыт аргоновыми лазерами или титан-сапфировыми, а также Yb-волоконными с внешними удвоителями частоты.

Ar⁺ – один из самых мощных лазеров видимого диапазона. С его помощью можно решать разнообразные научно-технические задачи. Аргоновые лазеры с длиной волны 514.5 нм ранее уже рассматривались как источник для спектроскопических исследований и работ, связанных со стабилизацией частоты лазера [14, 15, 16]. К положительным сторонам аргоновых лазеров относят их относительно высокую выходную мощность излучения (единицы ватт) [17]. Однако к недостаткам аргоновых лазеров нередко относят его стоимость и эксплуатационные характеристики. В работе [14] сообщается о создании Ar⁺ – лазера со стабильностью частоты 10^{-13} . Также сообщается о

сужении ширины линии излучения лазера до 20 кГц, посредством привязки частоты к склону полосы пропускания интерферометра Фабри–Перо.

Группа под руководством Wang-Yau Cheng исследовала субдоплеровские переходы молекулы йода в диапазоне длин волн 523...498 нм, используя удвоенный по частоте $Ti : sapphire$ лазер [12]. Работа опубликована под названием «Sub-Doppler molecular-iodine transitions near the dissociation limit (523...498 nm)» в 2002 году. В этой работе использовался $Ti : sapphire$ лазер, который имеет достаточно широкий диапазон перестройки частоты излучения. С его помощью были получены спектры сверхтонких переходов в диапазоне от 498 до 523 нм. Согласно предоставленным данным перестройка $Ti : sapphire$ лазера могла осуществляться в диапазоне 127 нм (от 1080 нм до 953 нм). Вторая гармоника была получена при помощи внутрирезонаторного удвоения с использованием нелинейного кристалла $KNbO_3$. На данном кристалле был достигнут не критичный по фазе (температурный) синхронизм. Величина перестройки во второй гармонике составила 25 нм (от 523 нм до 498 нм).

В нашей работе используется иттербиевый волоконный лазер с распределенной обратной связью. Перестройка по длине волны достигается посредством изменения температуры резонатора лазера с точностью до долей градуса. При этом смещение длины волны лазера и изменение температуры связано коэффициентом пропорциональности 0.019 нм / °С. Экспериментально полученная перестройка составила порядка 1 нм (1029...1030 нм). В нашей работе использовалась внутрирезонаторная генерация второй гармоники. В роли нелинейного кристалла использовался LBO (LiB_3O_5) [18]. На данном кристалле был достигнут критичный по фазе синхронизм I типа. Перестройка во второй гармонике составила 0.5 нм. Насколько нам известно, на данный момент не было опубликовано ни одной работы по спектроскопии йодного пара при помощи перестраиваемого непрерывного иттербиевого волоконного лазера с внешним удвоителем.

1. ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе для получения второй гармоники от волоконного иттербиевого непрерывного лазера использовалась техника удвоения частоты лазерного излучения во внешнем резонаторе. При помощи нелинейного кристалла фундаментальная гармоника преобразуется во вторую гармонику [19]. Величина мощности второй гармоники имеет квадратичную зависимость от мощности фундаментальной гармоники. Суть данной техники заключается в

размещении нелинейного кристалла внутри резонатора. Таким образом, накапливая энергию фундаментальной волны внутри резонатора, получаем вторую гармонику более высокой интенсивности. Для осуществления намеченных целей было необходимо собрать установку, показанную на рис. 1.

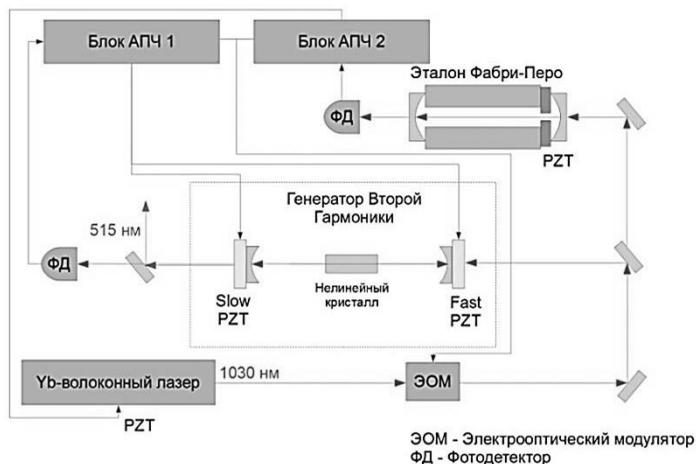


Рис. 1. Схема установки

Остановимся на схеме установки поподробнее. Ключевыми компонентами данной схемы являются генератор второй гармоники (ГВГ), эталон Фабри–Перо и Уб-волоконный непрерывный лазер с распределенной обратной связью.

В центре схемы расположен генератор второй гармоники, построенный на основе двухзеркального резонатора. Часть излучения лазера через светоделительное зеркало подается в эталон Фабри–Перо, а другая отраженная часть – в ГВГ. При этом часть, подаваемая в эталон, составляет 0.3 % излучения лазера. Эталон имеет высокую стабильность и используется для престабилизации частоты лазера при помощи автоматического блока АПЧ2. Использовался метод стабилизации Паунда–Драйвера–Холла с применением пробной фазовой модуляции излучения электрооптическим фазовым модулятором (ЭОМ) [20]. Сигнал отработки возмущений частоты лазера подается с блока АПЧ2 на керамику лазера. Таким образом компенсируются частотные возмущения частоты лазера и стабильность частоты определяется стабильностью эталона Фабри–Перо. Блок АПЧ1 предназначен для стабилизации и перестройки частоты ГВГ относительно лазера. В данном случае используется тот же принцип, что и для стабилизации частоты лазера по эталону. Однако, в отличие от схемы

стабилизации лазера, по эталону в схеме стабилизации удвоителя используются две керамики:

- с меньшей рабочей частотой, но с большим динамическим диапазоном для корректировки медленных возмущений, например тепловых шумов или дрейфов. Данная керамика называется Slow PZT (“Slow piezoelectric transducer” – в переводе с англ. «медленная пьезокерамика»);
- с большей рабочей частотой, но меньшим динамическим диапазоном для корректировки более высокочастотных возмущений, например акустических волн. Данная керамика названа Fast PZT (“Fast piezoelectric transducer” – в переводе с англ. «быстрая пьезокерамика»).

Для разделения фундаментальной и второй гармоник на некотором расстоянии до фотоприемника устанавливается зеркало, отражающее излучения в диапазоне 515 нм и пропускающее излучение 1030 нм. Излучение на первой гармонике 1030 нм проходит на фотоприемник для целей стабилизации резонатора ГВГ. По излучению фундаментальной гармоники производится работа блока АПЧ1.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

Для успешного проведения экспериментов с генератором второй гармоники предстояло провести измерения шумовых составляющих лазерного излучения и зависимости излучения второй гармоники от длины волны излучения.

Исследование шумовых характеристик

В дальнейшем для осуществления опытов по спектроскопии будет необходимо найти наименее зашумленный участок. При помощи широкополосного фотоприемника (ширина полосы ≈ 12 МГц) исследовались шумы разных источников. Для определения собственных шумов фотоприемника входное окно фотоприемника было закрыто и записаны данные с анализатора спектра (условное обозначение «PD»). Затем были измерены шумы лампы накаливания для определения уровня дробовых шумов (условное обозначение «Bulb»). После этого на вход фотоприемника было подано излучение 515 нм (условное обозначение «515 nm»). С результатом данного исследования можно ознакомиться на рис. 2. Из рисунка видно, что в излучении генератора второй гармоники присутствуют шумовые компоненты. Однако в диапазоне 3...5 МГц шумовой фон минимален, что может быть использовано в дальнейших экспериментах по спектроскопии молекулярного йода.

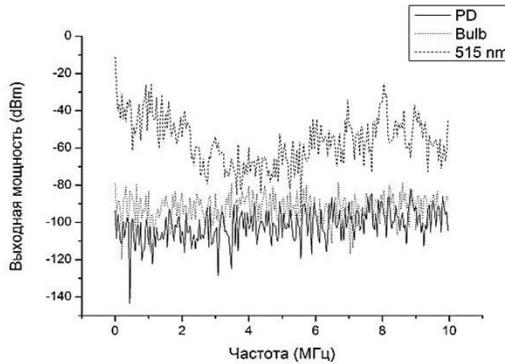


Рис. 2. Шумовые характеристики излучения генератора второй гармоники

Исследование перестройки по длине волны

Для изучения зависимости выходной мощности излучения 515 нм были произведены замеры мощности излучения второй гармоники в зависимости от длины волны лазера. Длина волны лазера перестраивалась в диапазоне 1 нм (1029...1030 нм) при помощи изменения температуры резонатора. При этом перестройка по длине волны второй гармоники осуществлялась в диапазоне 514.5...515 нм. Максимальная мощность была получена на длине волны 514.735 нм, при этом мощность составила 13.1 мВт. Результаты измерений отображены на рис. 3.

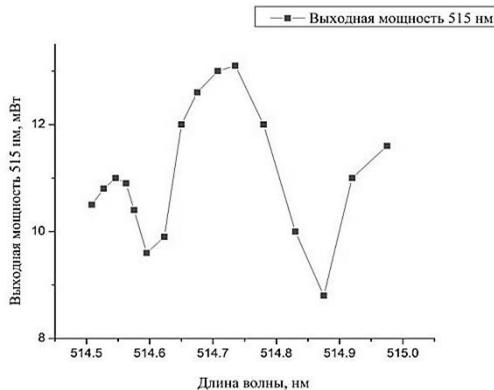


Рис. 3. Зависимость выходной мощности генератора второй гармоники от длины волны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был создан генератор второй гармоники на основе внешнего резонатора с нелинейным кристаллом LBO. Диапазон перестройки составил 0.5 нм в диапазоне 514.5...515 нм. Были измерены шумовые характеристики излучения второй оптической гармоники. Была измерена зависимость выходной мощности излучения 515 нм от длины волны. При использовании систем автоподстройки частоты (АПЧ1 и АПЧ2) было получено 13.1 мВт излучения на длине волны 514.735 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clearance of yellow tattoo ink with a novel 532-nm picoseconds laser / H. Alabdulrazzaq, J.A. Brauer, Y.S. Bae, R.G. Geroneus // *Lasers in Surgery and Medicine*. – 2015. – Vol. 47, iss. 4. – P. 285–288. – doi: 10.1002/lsm.22354.
2. Единый эталон времени и длины / С.Н. Багаев, В.Г. Гольдорт, А.С. Дычков, В.М. Клементьев, Ю.А. Матюгин, М.В. Никитин, Ю.Я. Печерский, В.П. Чеботаев // *Квантовая электроника*. – 1982. – Т. 9, № 3. – С. 453–462.
3. A dense grid of reference iodine lines for optical frequency calibration in the range 595–655 nm / S.C. Xu, R. van Dierendonck, W. Hogervorst, W. Ubachs // *Journal of Molecular Spectroscopy*. – 2000. – Vol. 201, iss. 2. – P. 256–266. – doi: 10.1006/jmsp.2000.8085.
4. A dense grid of reference iodine lines for optical frequency calibration in the range 571–596 nm / I. Velchev, R. van Dierendonck, W. Hogervorst, W. Ubachs // *Journal of Molecular Spectroscopy*. – 1998. – Vol. 187, iss. 1. – P. 21–27. – doi: 10.1006/jmsp.1997.7480.
5. Wavelength measurements of three iodine lines between 780 and 795 nm / B. Bodermann, G. Bonsch, H. Knockel, A. Nicolaus, E. Tiemann // *Metrologia*. – 1998. – Vol. 35, N 2. – P. 105–113. – doi: 10.1088/0026-1394/35/2/5.
6. Absolute frequency measurement of iodine lines with a femtosecond optical synthesizer / R. Holzwarth, A.Yu. Nevsky, M. Zimmermann, Th. Udem, T.W. Hänsch, J. von Zanthier, H. Walther, J.C. Knight, W.J. Wadsworth, P.St.J. Russell, M.N. Skvortsov, S.N. Bagayev // *Applied Physics B*. – 2001. – Vol. 73, iss. 3. – P. 269–271. – doi: 10.1007/s003400100633.
7. *Quinn T.J.* Mise en pratique of the definition of the metre // *Metrologia*. – 1994. – Vol. 30, N 5. – P. 523–541. – doi: 10.1088/0026-1394/30/5/011.
8. *Gerstenkorn S., Luc P.* Atlas du spectre d'absorption de la molecule d'iode (pt. 1). – Orsay (France): Laboratoire Aime-Cotton C.N.R.S.II, 1977. – 98 p.
9. *Hanes G.R., Dahlstrom C.E.* Iodine hyperfine structure observed in saturated absorption at 633 nm // *Applied Physics Letters*. – 1969. – Vol. 14, iss. 1. – P. 362–364. – doi: 10.1063/1.1652687.

10. Merimaa M., Ahtee V., Nyholm K. Absolute frequency measurement of an iodine-stabilized 543-nm He-Ne laser with modulation-synchronized phase-locked loop for improved frequency counting // CPEM 2008. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, Broomfield, Colorado, 8–13 June 2008. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 2008. – P. 312–313. – doi: 10.1109/CPEM.2008.4574778.
11. Ye J., Ma L.S., Hall J.L. Molecular iodine clock // Physical Review Letters. – 2001. – Vol. 87, iss. 27. – P. 270801/1–270801/4. – doi: 10.1103/PhysRevLett.87.270801.
12. Sub-doppler molecular-iodine transitions near the dissociation limit (523–498 nm) / W.-Y. Cheng, L. Chen, T.H. Yoon, J.L. Hall, J. Ye // Optics Letters. – 2002. – Vol. 27, iss. 8. – P. 571–573. – doi: 10.1364/OL.27.000571.
13. Comparison of molecular iodine spectral properties at 514.7 and 532 nm wavelengths / J. Hrabina, O. Acef, F. Burck, N. Chiodo, Y. Candela, M. Sarbort, M. Hola, J. Lazar // Measurement Science Review. –2014. – Vol. 14, iss. 4. – P. 213–218. – doi: 10.2478/msr-2014-0029.
14. Стабилизация частоты Ar⁺-лазера (514.5 нм) по резонансам насыщенного поглощения ¹²⁷I₂ / В.Г. Гольдорт, А.Н. Гончаров, А.Э. Ом, М.Н. Скворцов, В.П. Чеботаев // Оптические стандарты времени и частоты: сборник научных трудов / АН СССР, Сибирское отделение, Институт теплофизики. – Новосибирск: ИТФ, 1985. – С. 133–139.
15. Spieweck F. Frequency stabilization of an Ar⁺ laser with molecular iodine // Atomic Masses and Fundamental Constants. 5: proceedings of the 5th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Paris, June 1975. – New York: Springer Science+Business Media, 1976. – Pt. 8. – P. 372–377. – doi: 10.1007/978-1-4684-2682-3_54.
16. Argon ion laser with high frequency stability / V.P. Chebotayev, V.G. Goldort, A.N. Goncharov, A.E. Ohm, M.N. Skvortsov // Metrologia. – 1990. – Vol. 27, N 2. – P. 61–64. – doi: 10.1088/0026-1394/27/2/003.
17. Innova 90 [Electronic resource] // Coherent: web-site. – URL: <https://www.coherent.com/products/index.cfm?355/Innova-90> (accessed: 01.05.2015).
18. Lithium triborate – LBO crystals [Electronic resource] // Eksma Optics: website. – URL: <http://eksmaoptics.com/nonlinear-and-laser-crystals/nonlinear-crystals/lithium-triborate-lbo-crystals/> (accessed: 01.05.2015).
19. Generation of optical harmonic / P. Franken, A. Hill, C. Peters, G. Weinreich // Physical Review Letters. – 1961. – Vol. 7, iss. 4. – P. 118–119. – doi: 10.1103/PhysRevLett.7.118.
20. Black E.D. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization // American Journal of Physics. – 2001. – Vol. 69, iss. 1. – P. 79–87. – doi: 10.1119/1.1286663.

Скворцов Михаил Николаевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН. Основное научное направление – прецизионная спектроскопия молекулярного йода. Имеет более 100 публикаций. E-mail: skv@laser.nsc.ru

Вишняков Владислав Игоревич – магистр по направлению подготовки 011200 «Физика» (аспирант кафедры лазерной физики Новосибирского государственного технического университета). Основное научное направление – лазерная спектроскопия. Имеет 3 публикации. E-mail: split7fire@yandex.ru

514.5...515 nm wavelength emission for molecular iodine spectroscopy purposes*

M.N. Skvortsov¹, V.I. Vishnyakov²

¹ *Novosibirsk, Akademik Lavrentiev Prospect, 13/3, D. Sc. (Phys & Math.), 630090, Russian Federation, chief research scientist in ILP SBRAS. E-mail: skv@laser.nsc.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospect, 630073, Russian Federation, master student (Eng.) of science in physics, postgraduate of laser physics department. E-mail: split7fire@yandex.ru*

Current situation in laser spectroscopy was examined in the article, which includes using molecular iodine as a frequency standard. Introducing Second Harmonic Generator based on tunable ytterbium fiber laser and external cavity with LBO (LiB_3O_5 – Lithium triborate) crystal placed inside. SHG will be used in further spectroscopy experiments of molecular iodine. Special feature of this SHG is the source of laser radiation – ytterbium fiber distributed feedback (DFB) laser. Laser wavelength adjustment was in 1029...1030 nm wavelength range, with the help of cavity temperature tuning. Two mirror cavity with LBO crystal, placed in the cavity caustic, lay at the bottom of our SHG. Frequency autotuning system was used for SHG frequency stabilization purposes. Fabry-Perot cavity standard was used to raise frequency stability of the laser. Pound-Drever-Hall technique was used for SHG frequency stabilization. In the course of experiments, Second Harmonic Generator noise characteristics were measured. Photodetector noise characteristics were measured in order to take into consideration noise components, made by photodetector itself. Results gained were compared with noise characteristics from incandescent bulb with the same amount of light. Noise components to frequency dependance were obtained. Also Second Harmonic 514.5-515 nm wavelength range power/wavelength dependance was measured. Output Second Harmonic power to wavelength dependance graph was plotted. Finally, up to 13 mW of wavelength tuneable Second Harmonic was obtained.

Keywords: SHG, linear cavity, LBO, iodine, spectroscopy, Fabry–Perot cavity standard, Pound–Drever–Hall technique, fiber laser

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-116-127

* Received 17 February 2015.

REFERENCES

1. Alabdulrazzaq H., Brauer J.A., Bae Y.S., Geroneus R.G. Clearance of yellow tattoo ink with a novel 532-nm picoseconds laser. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2015, vol. 47, iss. 4, pp. 285–288. doi: 10.1002/lsm.22354
2. Bagaev S.N., Gol'dort V.G., Dychkov A.S., Klement'ev V.M., Matyugin Yu.A., Nikitin M.V., Pecherskii Yu.Ya., Chebotaev V.P. Edinyi etalon vremeni i dliny [Joint time and length standard]. *Kvantovaya elektronika – Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 9, no. 3, pp. 453–462. (In Russian)
3. Xu S.C., Dierendonck R. van, Hogervorst W., Ubachs W. A dense grid of reference iodine lines for optical frequency calibration in the range 595–655 nm. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2000, vol. 201 iss. 2, pp. 256–266. doi: 10.1006/jmsp.2000.8085
4. Velchev I., Dierendonck R. van, Hogervorst W., Ubachs W. A dense grid of reference iodine lines for optical frequency calibration in the range 571–596 nm. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1998, vol. 187, iss. 1, pp. 21–27. doi: 10.1006/jmsp.1997.7480
5. Bodermann B., Bonsch G., Knockel H., Nicolaus A., Tiemann E. Wave-length measurements of three iodine lines between 780 and 795 nm. *Metrologia*, 1998, vol. 35, no. 2, pp. 105–113. doi: 10.1088/0026-1394/35/2/5
6. Holzwarth R., Nevsky A.Y., Zimmermann M., Udem Th., Hansch T.W., Zanthier J. von, Walther H., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Skvortsov M.N., Bagayev S.N. Absolute frequency measurement of iodine lines with a femtosecond optical synthesizer. *Applied Physics B*, 2001, vol. 73, iss. 3, pp. 269–271. doi: 10.1007/s003400100633
7. Quinn T.J. Mise en pratique of the definition of the metre. *Metrologia*, 1994, vol. 30, no. 5, p. 523–541. doi: 10.1088/0026-1394/30/5/011
8. Gerstenkorn S., Luc P. *Atlas du spectre d'absorption de la molecule d'iode* (pt. 1). Orsay (France), Laboratoire Aime-Cotton C.N.R.S. II, 1977. 98 p.
9. Hanes G.R., Dahlstrom C.E. Iodine hyperfine structure observed in saturated absorption at 633 nm. *Applied Physics Letters*, 1969, vol. 14, iss. 1, pp. 362–364. doi: 10.1063/1.1652687
10. Merimaa M., Ahtee V., Nyholm K. Absolute frequency measurement of an iodine-stabilized 543-nm He-Ne laser with modulation-synchronized phase-locked loop for improved frequency counting. *CPEM 2008. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, Broomfield, Colorado, 8–13 June 2008, pp. 312–313. doi: 10.1109/CPEM.2008.4574778
11. Ye J., Ma L.S., Hall J.L. Molecular iodine clock. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 87, iss. 27, p. 270801/1–270801/4. doi: 10.1103/PhysRevLett.87.270801
12. Cheng W.-Y., Chen L., Yoon T.H., Hall J.L., Ye J. Sub-doppler molecular-iodine transitions near the dissociation limit (523–498 nm). *Optics Letters*, 2002, vol. 27, iss. 8, pp. 571–573. doi: 10.1364/OL.27.000571

13. Hrabina J., Acef O., Burck F., Chiodo N., Candela Y., Sarbort M., Hola M., Lazar J. Comparison of Molecular Iodine Spectral Properties at 514.7 and 532 nm Wavelengths. *Measurement Science Review*, 2014, vol. 14, iss. 4, pp. 213–218. doi: 10.2478/msr-2014-0029

14. Gol'dort V.G., Goncharov A.N., Om A.E., Skvortsov M.N., Chebotaev V.P. [Frequency stabilization of Ar-laser (514.5 nm) of saturated absorption resonances $^{127}\text{I}_2$]. *Opticheskie standarty vremeni i chastoty: sbornik nauchnykh trudov Instituta teplofiziki Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR* [Optical time and frequency standards: collection of scientific works of the Institute of Thermophysics, Siberian Branch of USSR Academy of Sciences], 1985, pp. 133–139.

15. Spieweck F. Frequency stabilization of an Ar^+ laser with molecular iodine. *Atomic Masses and Fundamental Constants. 5. Proceedings of the 5th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants*, Paris, June 1975. New York, Springer Science+Business Media, 1976, pt. 8, pp. 372–377. doi: 10.1007/978-1-4684-2682-3_54

16. Chebotayev V.P., Goldort V.G., Goncharov A.N., Ohm A.E., Skvortsov M.N. Argon ion laser with high frequency stability. *Metrologia*, 1990, vol. 27, no. 2, pp. 61–64. doi: 10.1088/0026-1394/27/2/003

17. Innova 90. *Coherent*: web-site. Available at: <https://www.coherent.com/products/index.cfm?355/Innova-90> (accessed 01.05.2015)

18. Lithium triborate – LBO crystals. *Eksma Optics*: website. Available at: <http://eksmaoptics.com/nonlinear-and-laser-crystals/nonlinear-crystals/lithium-triborate-lbo-crystals/> (accessed 01.05.2015)

19. Franken P., Hill A., Peters C., Weinreich G. Generation of optical harmonic. *Physical Review Letters*, 1961, vol. 7, iss. 4, pp. 118–119. doi: 10.1103/PhysRevLett.7.118

20. Black E.D. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization. *American Journal of Physics*, 2001, vol. 69, iss. 1, pp. 79–87. doi: 10.1119/1.1286663