

УДК 535.343.4

Фурье-спектроскопия водяных паров в 40-метровом оптическом транспортном канале Новосибирского лазера на свободных электронах*

**В.В. КУБАРЕВ, Н.А. ВИНОКУРОВ, Е.И. КОЛОБАНОВ, Г.Н. КУЛИПАНОВ,
А.Н. МАТВЕЕНКО, Т.В. САЛИКОВА, С.С. СЕРЕДНЯКОВ, М.А. ЩЕГЛОВ**

Излучение терагерцового Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) доставляется на пользовательские станции по 40-метровому оптическому каналу. Объем НЛСЭ с высоким вакуумом и оптический канал разделены окном из CVD-алмаза. Из-за достаточно большого размера субмиллиметровых пучков и отсутствия дешевых и прочных вакуумных окон подходящего размера мы используем для вывода излучения на пользовательские станции канал, заполненный азотно-воздушной смесью при нормальном атмосферном давлении, и тонкие полипропиленовые окна. Основная проблема этого длинного канала – поглощение в водяных парах. Для ее решения была создана специальная система осушки смеси на основе цеолитового поглотителя. В этой статье представлена комбинация Фурье-спектроскопии и спектроскопии с использованием лазера на свободных электронах для измерения ослабления излучения остаточными водяными парами.

Ключевые слова: поглощение в водяных парах, терагерцовое излучение, цеолитовый осушитель, лазер на свободных электронах.

ВВЕДЕНИЕ

Сейчас излучение НЛСЭ транспортируется из ускорительного зала, где существует опасность рентгеновского излучения, на пользовательские и диагностические станции при помощи 40-метрового оптического канала. В ближайшее время длина этого канала будет увеличена до 60–70 метров. Существуют две проблемы, связанные с этой системой. Первая – создание окон для мощного субмиллиметрового излучения (в настоящее время мощность непрерывного излучения НЛСЭ составляет 500 Вт [1], и в ближайшем будущем она будет увеличиваться). Вторая проблема – создание среды канала с низким поглощением. Вакуумная среда, конечно, идеальна, но с ней связана проблема вакуумных окон. Кроме очень дорогого CVD-алмаза, таким материалом может быть только чистый кремний. Но у него очень высокий коэффициент преломления и, следовательно, очень высокое отражение для нормального угла падения. Тогда окна из этого материала нужно устанавливать под углом Брюстера, что приводит к их большим размерам и высокой стоимости. Кремний непрозрачен в оптическом диапазоне, что делает невозможной юстировку канала при помощи оптических лазеров. Кроме того, нам также будет нужен быстрый затвор, чтобы предотвратить разрушение главного окна НЛСЭ из CVD-алмаза после возможного разрушения одного из пользовательских окон.

По этой причине мы сейчас. Была создана специальная система осушки, чтобы уменьшить их негативное влияние.

В этой работе представлены экспериментальные измерения эффективности системы осушки методом сканирования линии излучения НЛСЭ через выбранную линию поглощения водяных паров.

* Получена 15 мая 2012 г.

Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ и финансовой поддержке Минобрнауки России.

1. КОНСТРУКЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА

Схема оптического канала НЛСЭ показана на рис. 1. Излучение НЛСЭ выводится через окно из CVD-алмаза [2] в транспортный канал открытого оптического типа. Излучение приходит на пять пользовательских и две диагностические станции после отражений в некоей системе плоских и тороидальных зеркал. Спектроскопическая диагностическая станция с Фурье-спектрометром Bruker IFS-66vs находится в самой дальней точке канала (36 м от алмазного окна). Канал первоначально заполнен сухим азотом. Затем азотно-воздушная смесь циркулирует в замкнутой системе при давлении немного выше нормального, проходя через цеолитовый поглотитель паров воды. Поэтому во время работы НЛСЭ постоянно используется компрессор низкого давления. Излучение на станциях выводится в атмосферу через тонкие, легкозаменяемые окна из полипропиленовой пленки.

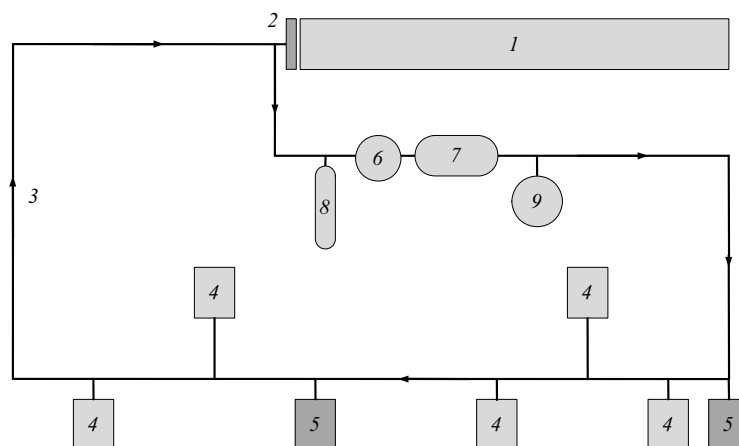


Рис. 1. Схема оптического канала НЛСЭ:

1 – НЛСЭ, 2 – окно из CVD-алмаза, 3 – оптический канал, 4 – пользовательские станции, 5 – диагностические станции, 6 – компрессор, 7 – резервуар с цеолитом, 8 – баллон с азотом, 9 – вакуумный насос

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Мы измеряли ТГц пропускание оптического канала методом, сочетающем в себе лазер на свободных электронах и Фурье-спектроскопию. Линия излучения лазера сканировалась через линию поглощения водяных паров. Обычно мы использовали линию с самым сильным поглощением на $\lambda = 180$ мкм для повышения точности эксперимента. Форма линии излучения лазера контролировалась при помощи Фурье-спектрометра, так как она могла изменяться во время процедуры сканирования в некоторых неоптимальных режимах. Были две возможности проведения эксперимента. Первая – это сканирование спектра узкой линией излучения лазера (рис. 2, а), когда основным изменяемым параметром является амплитуда линии излучения лазера. Вторая – сканирование по широкой линии излучения лазера, когда наибольший интерес представляет изменение формы линии (рис. 2, б). В обоих случаях мы восстанавливали линии излучения лазера, как показано на рис. 2 и рис. 3, по Фурье-спектру пропускания водяных паров соответствующей концентрации. Эта концентрация составляла примерно 1/300 от нормальной концентрации водяных паров при влажности 30–40 % в конце первых 2–3 месяцев работы нашей системы осушки (рис. 2). После регенерации цеолита в системе осушки плотность паров снижалась до 1/500 нормальной концентрации водяных паров (рис. 3, а). Процедура регенерации заключалась в нагреве и откачке резервуара, заполненного цеолитом.

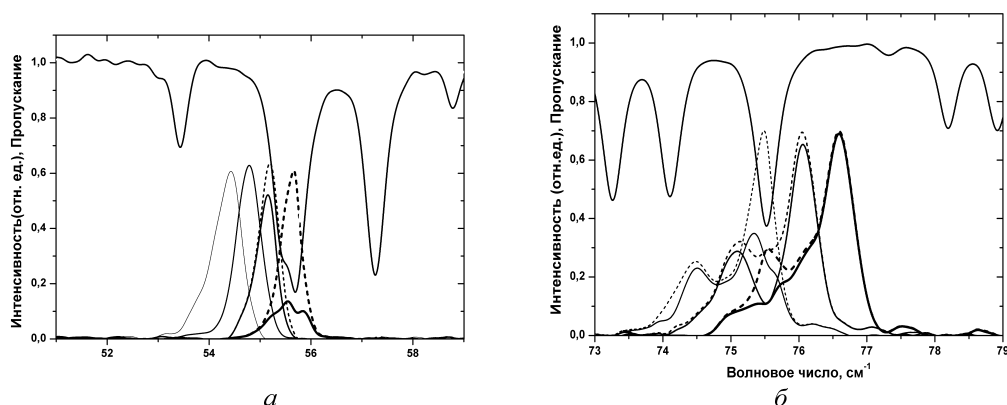


Рис. 2. Прохождение узких линий излучения ЛСЭ (черные линии) через 36-метровый оптический канал в области линии самого сильного поглощения в водяных парах (серая линия) после 2–3 месяцев работы системы сушки (а); то же самое для еще одной линии воды и широкой линии излучения ЛСЭ (б). Пунктирные линии показывают восстановленные линии излучения лазера

3. ТЕКУЩАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ПЛАНЫ

Как легко видеть на рис. 3, б, эффективность нашей системы осушки со свежим цеолитом такая же, как у лучших систем осушки этого типа. Но ее не достаточно для того, чтобы НЛСЭ работал без заметного влияния линий паров воды. Мы планируем улучшить нашу систему осушки с при помощи макромолекулярного мембранного осушителя с точкой росы $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальном давлении [3]. У существующей в настоящее время системы осушки этот параметр составляет около $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта разница в величине точки росы эквивалентна шестикратной разнице в плотности паров воды. Для нашего достаточно большого объема системы осушки ($\sim 1\text{ м}^3$) мы ожидаем уменьшения этой плотности в три раза. Пропускание оптического канала в этом случае иллюстрирует пунктирная линия на рис. 3, б. Видно, что влияние паров воды становится достаточно малым. Если такое улучшение будет невозможно, мы планируем создать вакуумный оптический канал, установив подходящие выходные окна из CVD-алмаза.

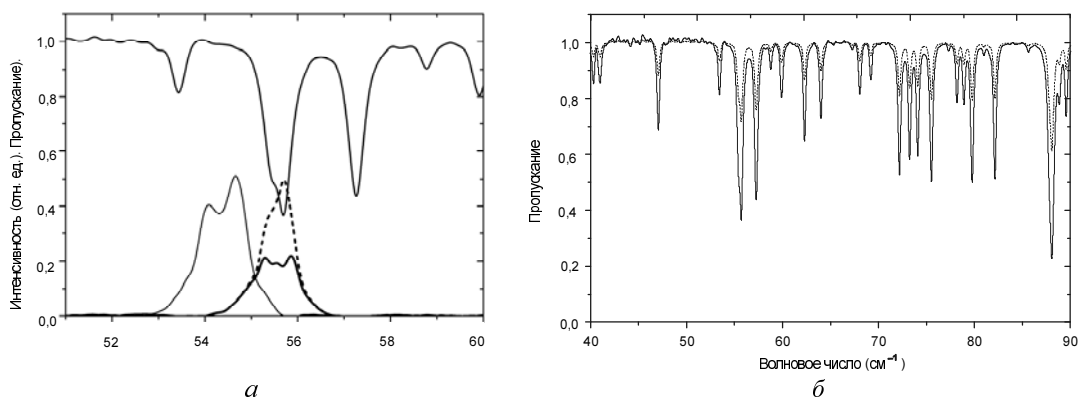


Рис. 3. Прохождение линий излучения ЛСЭ (черные линии) через 36 м оптический канал в области линии самого сильного поглощения в водяных парах (серая линия) для регенерированного цеолита в системе сушки (а); пунктирная линия показывает восстановленную линию излучения лазера. Пропускание оптического канала в основном диапазоне НЛСЭ (б): в настоящее время (сплошная линия) и планируемое в будущем (пунктирная линия)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Bolotin V.P., Vinokurov N.A., Gavrilo N.A. et al.** Status of the Novosibirsk energy recovery linac, Nucl. Instr. & Meth. A, 2006. – Vol. 557. – P. 23–27.
- [2] **Kubarev V.V.** Optical properties of CVD-diamond in terahertz range and its applications on the NovoFEL // Conference digest of the Joint 32nd international conference on infrared and millimetre waves, and 15th International conference on terahertz electronics, Cardiff, UK, 3rd –7th Sept., 2007/ Digest eds: M.J. Griffin et al. – Piscataway: IEEE, 2007. – Vol. 2. – P. 863–865.
- [3] Membrane air dryer IDG series. Materials of SMC Corporation. – Japan, 2000, <http://www.smeworld.com>.

Кубарев Виталий Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 70 публикаций. E-mail: V.V.Kubarev@inp.nsk.su.

Винокуров Николай Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Института ядерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 200 публикаций. E-mail: N.A.Vinokurov@inp.nsk.su.

Колобанов Евгений Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 30 публикаций. E-mail: E.I.Kolobanov@inp.nsk.su.

Кулипанов Геннадий Николаевич, академик РАН, профессор, заместитель директора ИЯФ СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 300 публикаций. E-mail: G.N.Kulipanov@inp.nsk.su.

Матвеенко Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, профессор Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Institut für Beschleunigerphysik (HZB), 12489 Berlin, Albert-Einstein-Str. 15. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 100 публикаций. E-mail: aleksandr.matveenko@helmholtz-berlin.de.

Саликова Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 20 публикаций. E-mail: T.V.Salikova@inp.nsk.su.

Середняков Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 30 публикаций. E-mail: S.S.Serednyakov@inp.nsk.su.

Щеглов Михаил Алексеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН. Основное направление научных исследований – физика ускорителей. Имеет более 25 публикаций. E-mail: M.A.Scheglov@inp.nsk.su

**V.V. Kubarev, N.A. Vinokurov, E.I. Kolobanov, G.N. Kulipanov, A.N. Matveenko,
T.V. Salikova, S.S. Serednyakov, M.A. Scheglov**

Fourier Spectroscopy of Water Vapor Absorption in 40 m Optical Transport Channel of the NovoFEL

Radiation of the Novosibirsk terahertz free electron laser (NovoFEL) is transported to user stations by a 40 m long optical channel. A high vacuum volume of the NovoFEL and the optical channel are separated by a CVD-diamond window. Because of a sufficiently large size of submillimeter beams and the absence of cheap and firm vacuum windows of an adequate size, we use a nitrogen-filled channel at normal atmospheric pressure and thin polypropylene windows for radiation coupling on the user stations. The main problem of the long channel is water vapor absorption. A special system of drying with round circulation was made on the basis of a zeolite absorber. A combination of Fourier and free electron laser spectroscopy of the system is presented in this paper.

Key words: water vapor absorption, terahertz radiation, zeolite dryer, free electron laser.