

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО СГЛАЖИВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ

*Н. Д. Бухарский, К. Л. Губский, А. П. Кузнецов*

Национальный исследовательский университет «МИФИ», г. Москва

Одной из значимых проблем в экспериментах на установках килоджоульного и мегаджоульного уровня, предназначенных для исследований в области физики высоких плотностей энергии и, в частности, применения лазерного термоядерного синтеза в энергетике, является обеспечение достаточно высокой степени однородности облучения мишени. Недостаточная однородность облучения мишени приводит к нарушению симметрии ее сжатия и зарождению в окружающей мишень плазме газодинамических неустойчивостей, приводящих к перемешиванию материала оболочки мишени с термоядерным горючим, в результате чего процесс сжатия мишени нарушается, и зажигание осуществить не удастся.

Наличие в пучке случайных фазовых корреляций приводит к возникновению в распределении интенсивности на мишени интерференционной спекл-структуры. Для снижения влияния этого эффекта на степень однородности облучения мишени в современных высокомоощных комплексах используются системы, основанные на методике пространственно-временного сглаживания (ПВС). Основной принцип ПВС заключается в том, чтобы заставить спекл-структуру сместиться в поперечном сечении пучка направлении. Если время эффективного смещения будет меньше, чем время газодинамического отклика плазмы (10–100 пс [1]), то высокоинтенсивные пики не окажут существенного влияния на движение плазмы, и мишень будет воспринимать интегральное распределение, полученное в результате наложения спекл-картин за время усреднения.

Реализация ПВС на установках с твердотельной средой усилительного тракта, например, неодимовым стеклом, требует особого подхода, где в усилительном тракте не возникало бы сильной модуляции интенсивности, влекущей за собой большую вероятность его повреждения. Такой подход был предложен в [2] и получил название *Smoothing by Spectral Dispersion (SSD)* – Сглаживание с помощью Спектральной Дисперсии (ССД). Принципиальная схема данного метода приведена на рис. 1. Лазерное излучение от задающего генератора вводится в электрооптический фазовый модулятор, действие которого приводит к тому, что фаза на выходе из модулятора начинает меняться по синусоидальному закону, а спектр излучения уширяется. Затем пучок подается на дифракционную решетку, осуществляющую пространственное разделение компонент фазомодулированного сигнала вследствие чего различные участки фазовой пластинки, используемой в системе фокусировки для формирования огибающей распределения интенсивности на мишени, приобретают друг относительно друга различный фазовый набег, изменяющийся во времени в соответствии с разностью частот спектральных компонент излучения, облучающего эти участки; поверхности равной фазы при этом приобретают наклон, величина которого определяется дисперсией решетки. Суммарное распределение интенсивности на мишени определяется наложением сдвинутых друг относительно друга распределений от каждого из участков фазовой пластинки в системе фокусировки. В результате совместного действия фазового модулятора и дифракционной решетки это распределение начинает перестраиваться во времени вдоль направления, параллельного направлению дисперсии решетки. При этом скорость такой перестройки определяется величиной, обратной времени когерентности модулированного по фазе излучения, то есть шириной его спектра.

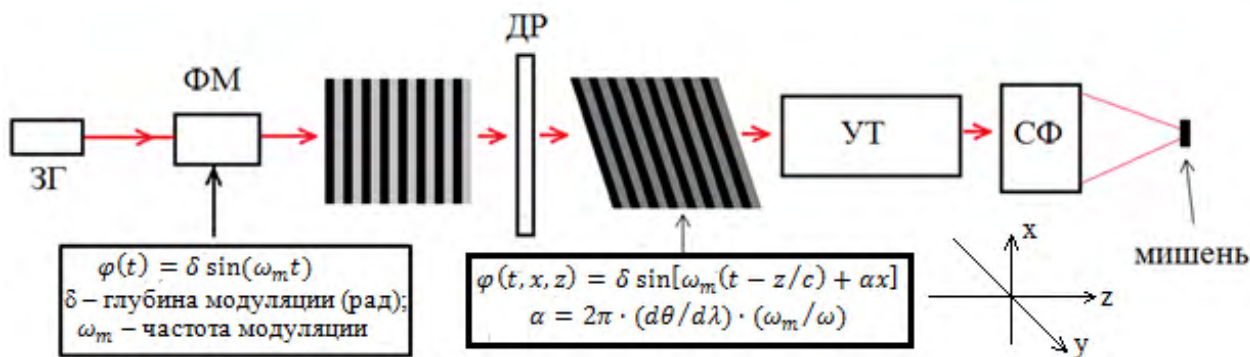


Рис. 1. Принципиальная схема метода ССД; ЗГ – задающий генератор, ФМ – фазовый модулятор, ДР – дифракционная решетка, УТ – усилительный тракт, СФ – система фокусировки

В данный момент ведется разработка системы одномерного пространственно-временного сглаживания с помощью спектральной дисперсии для использования в лазере мегаджоульного уровня энергии. При этом подсистема ФМ должна обеспечивать для начальной низкоинтенсивной части лазерного импульса модуляцию на одной или двух (для уменьшения уровня асимптотического контраста посредством подавления когерентных резонансов [3]) частотах до 30 ГГц с амплитудой до 3 рад; в то же время для основной высокоинтенсивной части импульса, где существенной становится проблема перехода фазовой модуляции в амплитудную [4], должна быть предусмотрена возможность модуляции лишь на низкой частоте (до 3 ГГц с общей шириной спектра до 30 ГГц для подавления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна). Существенное влияние на эффективность сглаживания оказывает спектр модулированного по фазе сигнала. Для его измерения с целью подбора и оптимизации параметров сглаживания (частот модуляции и мощностей СВЧ-сигнала на входе в модулятор) был поставлен предварительный эксперимент, схема которого приведена на рис. 2.

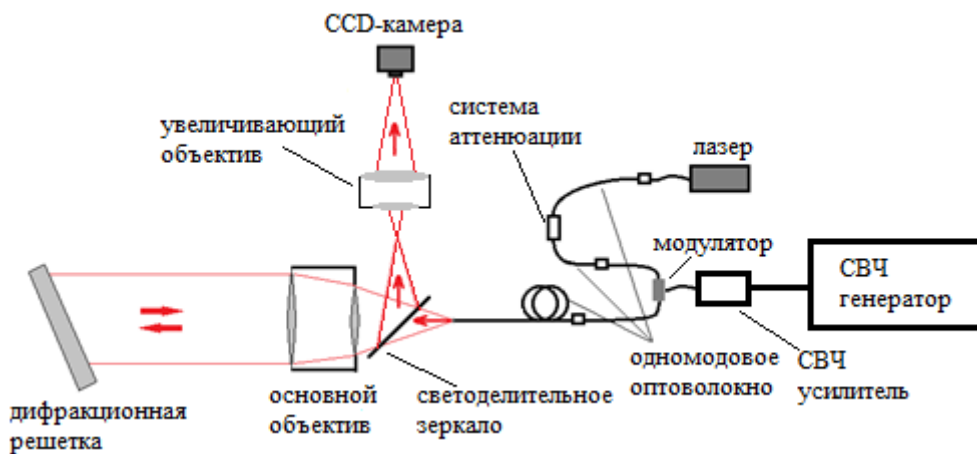


Рис. 2. Схема предварительного эксперимента по измерению модуляционного уширения спектра

Свет из оптоволоконного выхода импульсного Nd:YAG микрочип-лазера с полупроводниковой накачкой и пассивной модуляцией добротности Team Photonics STP-10E-F20, работающего на длине волны  $\lambda = 1,064$  мкм с энергией в импульсе  $\sim 7$  мДж, длительностью импульса  $\sim 8$  нс (пиковая мощность  $\sim 750$  Вт) и частотой следования импульсов, установленной на 600 Гц, вводится в оптоволоконный тракт, включающий в себя участки одномодового APC/APC волокна 9/125 мкм, систему оптоволоконной аттенюации с вносимым затуханием -37 дБ и фазовый модулятор EOSPACE-Phase-40G-lowVpri, на СВЧ-вход которого подается сигнал от СВЧ-генератора Микран Г7М-40, усилен-

ный при помощи СВЧ-усилителя Микран МШУ-50/1. Выходящее из ОБ излучение коллимируется основным объективом с апертурой  $\sim 5$  см и фокусным расстоянием  $f_1 = 300$  мм в параллельный пучок и направляется на дифракционную решетку, включенную в систему по схеме Литтрова, с дисперсией в -1 порядке  $\frac{d\theta}{d\lambda} = 150$  мкрад/Å. Испытавший дифракцию на решетке свет отражается в обратном направлении, повторно проходит основной объектив, отражается от светоделительного зеркала и, пройдя увеличивающий объектив, фокусируется на матрице камеры с размером пикселя 6,7 мкм. В первоначальной схеме использовался только один объектив, однако спектральное разрешение на матрице камеры в такой схеме было принято недостаточно высоким (3,25 ГГц/пикс для камеры с размером пикселя 5,5 мкм) для детального исследования спектра фазомодулированного сигнала, в особенности при низких частотах модуляции; включением в схему второго объектива с фокусным расстоянием  $f_2 = 75$  мм разрешение на матрице камеры удалось повысить в несколько раз (до величины 0,464 ГГц/пикс). Мощность СВЧ-сигнала на входе в модулятор в диапазоне частот до 18 ГГц определялась при помощи СВЧ измерителя мощности Keysight U2000H (диапазон измеряемых частот до 18 ГГц), за пределами же этого диапазона она оценивалась исходя из известной спектральной зависимости коэффициентов усиления МШУ-50/1, их зависимости от мощности сигнала на входе в усилитель и пропускания СВЧ тракта.

Далее будут приведены полученные для двух различных значений частоты (условно низкой 5 ГГц и высокой 30 ГГц) графики распределения плотности энергии на матрице камеры при различных значениях мощности СВЧ-сигнала на входе в модулятор (рис. 3, 4). В эксперименте лазер работал в двухмодовом режиме с расстоянием между модами 26 ГГц и непостоянным в течение измерений соотношением их интенсивностей. На графиках приведены две зависимости – непосредственно измеренное по показаниям камеры распределение плотности энергии (зависимость «эксп») и аппроксимирующая его зависимость, подобранная при помощи MATLAB Curve Fitting Toolbox (зависимость «аппрок»). В соответствии с теорией поле на выходе из модулятора  $E_{\text{вых}}$  при синусоидальной фазовой модуляции с частотой  $\omega_m$  и индексом модуляции  $\delta$  монохроматического излучения с частотой  $\omega$  и значением амплитуды  $E_0$  имеет следующий вид:

$$E_{\text{вых}} = E_0 \exp\left\{i\left[\omega t + \delta \sin(\omega_m t)\right]\right\} = E_0 \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\delta) e^{in\omega_m t} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(\delta) e^{-in\omega_m t} \right\} e^{i\omega t} \quad (1)$$

где  $J_n$  – функции Бесселя  $n$ -го порядка. Перераспределение энергии по возникающим в результате модуляции боковым полосам определяется квадратами коэффициентов перед экспонентами в формуле (1). Исходное распределение плотности энергии на матрице камеры  $S_{\text{исх}}(\omega)$  представляет из себя два частично накладывающихся друг на друга лоренцевых контура, соответствующих двум модам лазера. С учетом вышесказанного в качестве аппроксимирующей была взята следующая зависимость:

$$S_{\text{апп}}(\omega) = \sum_{n=-n_{\text{max}}}^{+n_{\text{max}}} S_{\text{исх}}(\omega - n\omega_m) \cdot J_n^2(\delta), \quad (2)$$

где  $n_{\text{max}}$  – некоторое заведомо большее максимально возможного при конкретном уровне мощности на входе в модулятор индекса модуляции  $\delta$  число, для которого функции Бесселя порядков  $n \geq n_{\text{max}}$  можно с высокой точностью считать равными нулю. При этом соотношение амплитуд лоренцевых пиков в исходном распределении  $A_1/A_2$  и индекс модуляции  $\delta_{\text{аппрокс}}$  подбирались программой.

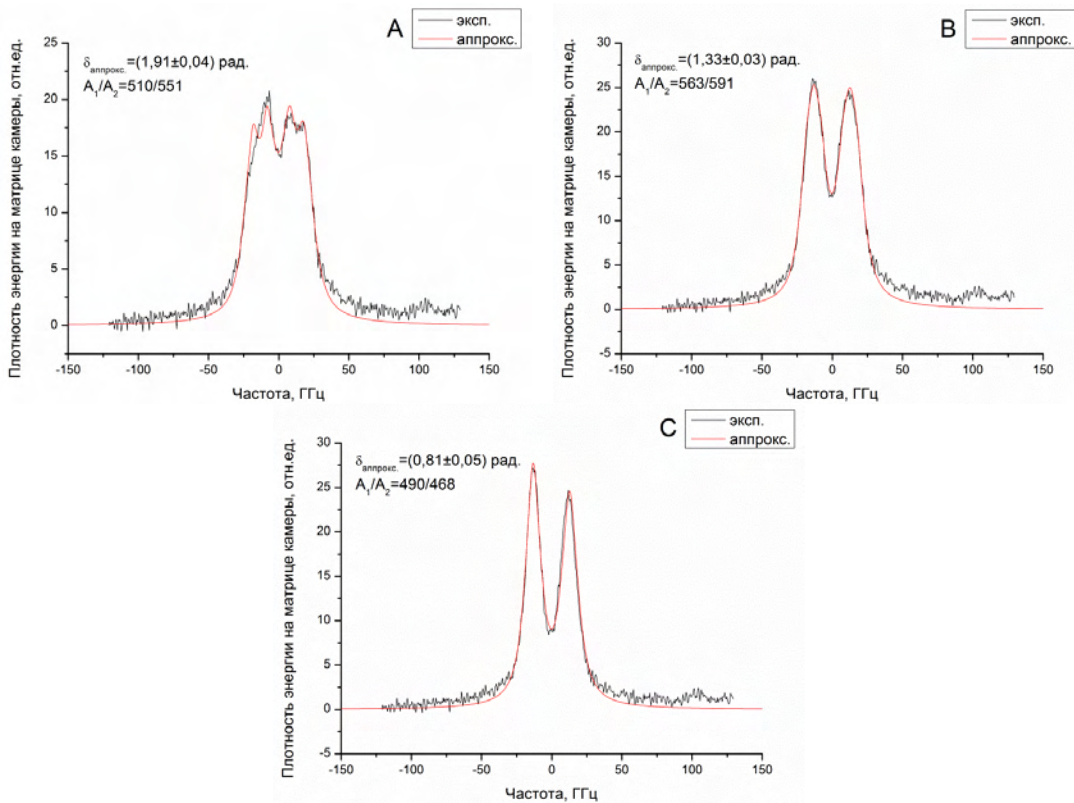


Рис. 3. График зависимости плотности энергии на матрице камеры при частоте модуляции 5 ГГц и мощности на входе в модулятор. А – 21,4 дБ. В – 18, 1 дБм. С – 14,2 дБм

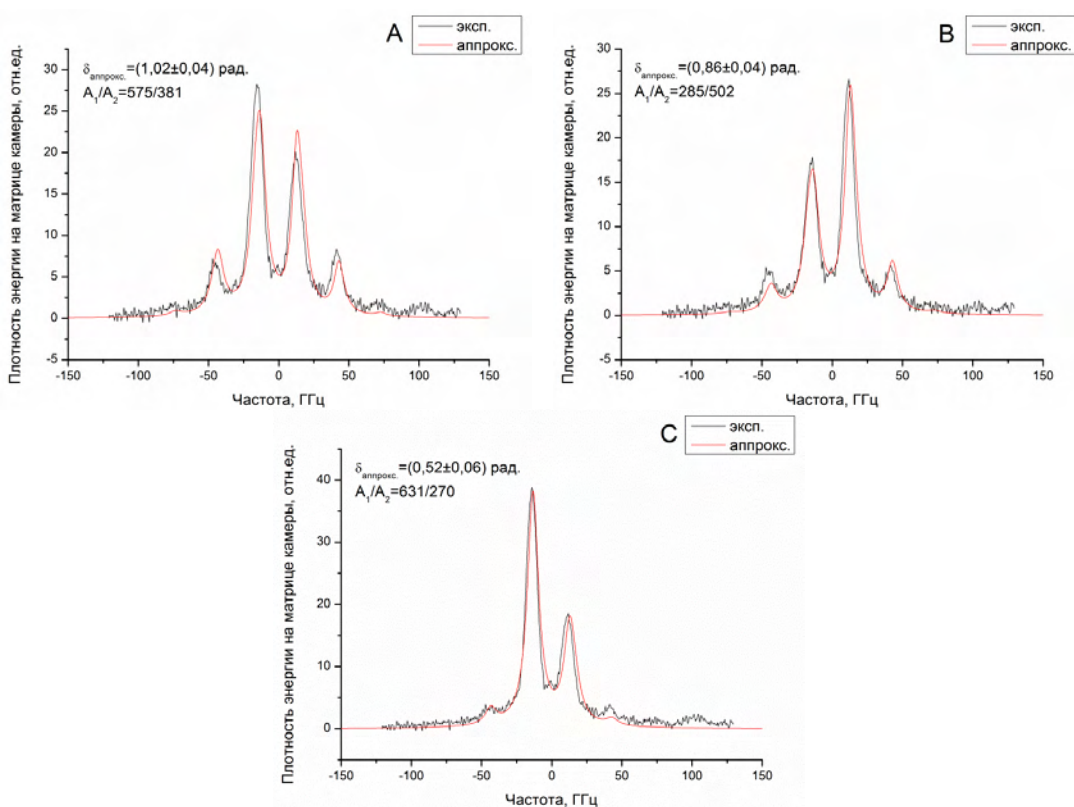


Рис. 4. График зависимости плотности энергии на матрице камеры при частоте модуляции 30 ГГц и мощности на входе в модулятор. А –  $(21,8 \pm 1,1)$  дБм. В –  $(17,1 \pm 1,1)$  Бм. С –  $(13,3 \pm 1,1)$  дБм

Неопределенность полученных в результате аппроксимации индексов модуляции не превышает 12 %. Данная цифра свидетельствует о том, что выбранная методика аппроксимации адекватно описывает экспериментальные данные и подходит для моделирования уширенного в результате фазовой модуляции спектра. В дальнейшем она будет использована для подбора параметров разрабатываемой системы ССД.

### Список литературы

1. Гаранин, С. Г., Деркач, В. Н., Шнягин, Р. А. Формирование однородного облучения мишени на мощных лазерных установках. *Квантовая электроника*, 2004. 34, № 5, С. 427–446.
2. Skupsky, S. et al. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light. *J. Appl. Phys.*, 1989. V. 66, P. 3456–3462.
3. Rothenberg, J. E. Comparison of beam-smoothing methods for direct-drive inertial confinement fusion. *J. Opt. Soc. Am. B* 1997. V. 14. P. 1664.
4. Kruschwitz, B. E. et al. Commissioning of a multiple-frequency modulation smoothing by spectral dispersion demonstration system on OMEGA EP. *Proc. SPIE* 8602, 86020E–86020E–11 (2013).