

## Многофокусная структура светового филамента

Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 16.03.2011 г.

Теоретически рассмотрена динамика образования светового филамента при нестационарной самофокусировке фемтосекундного лазерного импульса сверхкритической мощности в воздухе. В терминологии эффективного радиуса пучка проведена качественная интерпретация данного процесса в рамках модели филамента как множества нелинейных фокусов, образованных при послышной фокусировке светового импульса. При этом наименьший размер фокальной перетяжки имеют временные слои, расположенные в центре и на заднем фронте импульса, а наибольший — на переднем. Совокупность фокальных пятен отдельных временных слоев импульса формирует протяженную перетяжку переменного диаметра, представляющую собой световой филамент.

**Ключевые слова:** ультракороткое лазерное излучение, самофокусировка, филаментация, фотоионизация, движущиеся фокусы; ultrashort laser radiation, Kerr self-focusing, laser filamentation, photoionization, moving focuses.

Филаментация мощного лазерного излучения фемтосекундной длительности, происходящая вследствие нестационарной керровской самофокусировки импульса в среде, уже несколько десятилетий является объектом пристального изучения специалистов различных стран (наиболее полное состояние проблемы представлено в обзорах [1–3] и монографиях [4, 5]). Такой интерес обусловлен, прежде всего, перспективами использования данного явления в ряде практических атмосферных приложений, таких как создание протяженного ионизированного канала в атмосфере [6], многокомпонентное детектирование загрязняющих веществ [7], передача световой энергии [8], генерация в терагерцовом диапазоне электромагнитных импульсов [9] и др.

Физическая причина филаментации заключается в сильной пространственно-временной самомодуляции фемтосекундного импульса при его распространении в среде, проявляющейся во временной компрессии импульса и последующем распаде пучка в поперечном направлении на области с высокой интенсивностью. При этом средний диаметр филамента в атмосферном воздухе для ИК-излучения составляет порядка сотни микрометров, пиковая интенсивность достигает сотен тераватт на квадратный сантиметр, а средняя протяженность филамента на горизонтальной атмосферной трассе, как правило, десятков метров [2].

В теоретическом плане для описания филаментации светового импульса широко используется формализм нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [4], которое представляет собой дифференциальное

уравнение в частных производных параболического типа и позволяет рассчитывать медленно меняющуюся амплитуду световой волны в рамках параксиального, однонаправленного распространения в нелинейной среде. Модель оптической нелинейности газовой среды включает в себя, как правило, электронный и молекулярный эффекты Керра, нелинейную рефракцию и поглощение в формирующейся в канале пучка плазме, а также нелинейности высших порядков по полю [1].

В общем случае для корректного описания самофокусировки фемтосекундных импульсов необходимо численное решение четырехмерного НУШ для вектора электрического поля, что даже при современном состоянии вычислительных мощностей компьютеров является непростой задачей и поэтому существенно ограничивает диапазон параметров лазерного излучения, которые могут быть численно исследованы. Эта проблема стимулировала появление качественных моделей самофокусировки и филаментации фемтосекундного импульса, которые трактуют данный процесс с точки зрения известных физических ситуаций, например модель самонаведенного диэлектрического волновода [10], модель динамически восполняющегося «фотонного резервуара» [11], модель нелинейных конических волн (X-волн) [12] и, наконец, модель движущихся нелинейных фокусов [13, 14]. Ни одна из этих моделей не может считаться универсальной, каждая из них описывает только одну или несколько сторон наблюдаемого явления, однако все они хотя и являются качественными, но способны дать и количественные оценки некоторых параметров процесса.

Модель движущихся фокусов (ДФ) исторически была первой физической моделью филамента. Она трактует световой филамент как множество локальных

\* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru).