

## Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Косаревой Ольги Григорьевны, на диссертационную работу Кузьмина Игоря Валерьевича «Управление параметрами лазерных импульсов для генерации электронных сгустков в фотоинжекторах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Профилированные лазерные импульсы ультрафиолетового диапазона применяются в фотоинжекторах электронов для генерации электронных сгустков с поверхности фотокатода. От пространственно-временного распределения интенсивности лазерного излучения, воздействующего на катод, зависит распределение пространственного заряда у генерируемых электронных сгустков. Управление распределением пространственного заряда в сгустке необходимо для минимизации нормализованного поперечного эмиттанса, ускорения электронных сгустков в поле кильватерной волны, генерации мощного терагерцового излучения в ондуляторе.

Для каждой из приведенных задач требуется своя оптимальная форма распределения пространственного заряда. В частности для минимизации нормализованного поперечного эмиттанса необходимо распределение пространственного заряда в форме 3D эллипсоида. Для увеличения коэффициента трансформации энергии в поле кильватерной волны требуется линейно возрастающая во времени плотность заряда у управляющего электронного сгустка. Электронные сгустки с периодической модуляцией электронной плотности во времени востребованы для генерации терагерцового излучения.

Таким образом, диссертационная работа Кузьмина И.В., посвященная формированию и диагностике 3D профилированных чирпированных лазерных импульсов видимого и УФ диапазонов, является актуальной.

### **Содержание работы**

Во **введении** работы автором обоснована актуальность темы исследования, приведены цели и решаемые задачи, представлены научная новизна и практическая значимость работы, а также краткий обзор научных исследований по тематике работы. Определен личный вклад автора и выносимые на защиту положения.

В **первой главе** представлены результаты численных и экспериментальных исследований по формированию лазерных импульсов с квазитреугольным распределением интенсивности и лазерных импульсов с периодической модуляцией (частота модуляции  $\sim 1$  ТГц) интенсивности. Рассмотренный в диссертации способ формирования квазитреугольных импульсов основан на управлении спектральным распределением интенсивности у спектров. В этом случае для формирования квазитреугольных импульсов во времени

необходимо сформировать квазитреугольное спектральное распределение интенсивности. В работе такой подход был реализован с помощью оптического компрессора с нулевой частотной дисперсией и пространственного модулятора света, размещенного в Фурье-плоскости компрессора. Численно определены основные закономерности формирования квазитреугольных временных распределений интенсивности и найдены условия для их оптимального получения.

Предложен и рассмотрен метод создания управляемой периодической модуляции распределения интенсивности чирпированных лазерных импульсов со сложной пространственно-временной структурой за счёт внесения дополнительной периодической модуляции в фазу спектра. Численно и аналитически (для гауссова распределения интенсивности) показана зависимость глубины временной модуляции от амплитуды и периода модуляции фазы, параметра линейного чирпа. Показано, что существуют оптимальные наборы параметров, при которых в распределении интенсивности наблюдаются минимальные искажения.

В главе представлены результаты исследований о возможности использования поляризационных интерферометров для создания управляемой по глубине и частоте пикосекундной периодической модуляции у исходных чирпированных широкополосных лазерных импульсов с длительностью 10-30 пс. Предложены схемы профилирования на основе интерферометра Майкельсона и интерферометра в "in-line" исполнении. В "in-line" схеме интерферометр Майкельсона заменяется на двулучепреломляющий кристалл, вырезанный под определенным углом к оптической оси. Также продемонстрировано, что размещение на выходе из оптической схемы вместо поляризационного делителя двулучепреломляющего кристалла позволяет скомпенсировать задержку между модулированными импульсами с ортогональной поляризацией. В этом случае суммарная интенсивность будет промодулирована с глубиной, зависящей от величины задержки, но поляризация будет зависеть от времени.

Во **второй главе** численно и аналитически рассмотрены задачи, связанные с сохранением пространственно-временной формы в процессах генерации суммарной частоты линейно чирпированными широкополосными лазерными импульсами. Предложено два возможных способа решения таких задач: 1) генерация суммарной частоты лазерными импульсами с угловым чирпом (наклонным амплитудным фронтом); 2) неколлинеарная генерация второй гармоники импульсами с равными по абсолютной величине и разными по знаку линейными частотными чирпами. В первом способе обеспечивается равенство групповых скоростей взаимодействующих импульсов, а второй способ позволяет получить лазерный импульс второй гармоники с малой (близкой к Фурье-пределу от длительности чирпированного импульса) шириной спектра и 3D распределением интенсивности, повторяющим распределение интенсивности фундаментальной гармоники.



В главе получены системы уравнений, описывающие неколлинеарное трёхволновое взаимодействие сверхширокополосных лазерных импульсов с частотным и угловым чирпами, в том числе и с учетом попутной генерации при неколлинеарной генерации второй гармоники. На примере лазерных импульсов с 3D эллипсоидальным распределением интенсивности продемонстрирована возможность высокоэффективной генерации излучения второй и четвертой гармоник с сохранением формы за счет применения чирпирования по углу (амплитудного наклона). Определены условия, при которых излучение третьей гармоники Ti:Sa лазера, генерируемое в результате неколлинеарного взаимодействия в кристалле чирпированных по углу импульсов первой и второй гармоник, является коллимированным и сохраняет 3D структуру распределения интенсивности импульса первой гармоники.

В главе показано, что использование углового чирпа позволяет сохранить 3D структуру лазерных импульсов при наличии периодической модуляции во времени. Продемонстрировано, что применение при ГВГ неколлинеарной схемы взаимодействия лазерных импульсов (с шириной спектра  $\sim 60$  нм) с одинаковыми по абсолютному значению и противоположными по знаку частотными чирпами позволяет сохранить 3D распределение интенсивности (в том числе и промодулированное во времени) при высокой эффективности преобразования. Также в главе продемонстрировано, что при генерации четвертой гармоники лазерного импульса с периодической модуляцией интенсивности возможно управление глубиной модуляции с сохранением крупномасштабной 3D структуры поля за счёт совместного действия дисперсии и нелинейности при преобразовании.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования кросскорреляционных схем для определения сформированной 3D формы второй и четвертой гармоник лазерного излучения. Для диагностики 3D формы второй гармоники рассмотрен кросскоррелятор, в котором происходит генерация суммарной частоты. Для диагностики четвертой гармоники рассмотрен кросскоррелятор на основе генерации разностной частоты. В таких устройствах организовано взаимодействие профилированного рабочего импульса и синхронизированного с ним во времени диагностического  $\delta$ -импульса в нелинейном кристалле. Интенсивность сгенерированной гармоники в ненасыщенном режиме преобразования пропорциональна интенсивности рабочего импульса, что позволяет полностью восстановить трехмерное пространственно-временное распределение интенсивности. Показано, что корректная диагностика 3D формы широкополосных чирпированных лазерных импульсов видимого и УФ-диапазонов, обладающих периодической модуляцией во времени, возможна с использованием сканирующего кросскоррелятора при отсутствии у диагностируемого импульса углового чирпа.

Также в главе с помощью численного моделирования проанализирована точность определения длительности малопериодных лазерных импульсов с центральными длинами

волн 910 нм и 780 нм при использовании одноимпульсного автокоррелятора интенсивности второго порядка на базе кристалла KDP. Показано, что точность восстанавливаемой длительности для спектрально-ограниченных импульсов зависит как от толщины нелинейного кристалла, так и от угла схождения диагностируемых пучков. Показано, что существует оптимальный угол, при котором восстановление длительности происходит с наименьшей ошибкой. Также показана точность определения длительности автокорреляционной функции для малопериодных импульсов с квадратичной и кубичной модуляцией фазы спектра.

**В Заключение** приведены основные результаты диссертации.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Исследована возможность формирования лазерных импульсов с квазитреугольным временным распределением интенсивности в ИК-области спектра при использовании SLM. В экспериментах сформированы лазерные импульсы пикосекундной длительности ( $\sim 30$  пс, длина волны 1036 нм, ширина спектра 8 нм) с квазитреугольным распределением интенсивности во времени.
2. Предложен метод создания управляемой по глубине и периоду модуляции во временном распределении интенсивности у широкополосных линейно чирпированных лазерных импульсов за счет внесения дополнительной гармонической модуляции в фазу спектра.
3. Предложено использовать поляризационный интерферометр Майкельсона для создания периодической модуляции с характерной частотой (0.2-2 ТГц) у исходных чирпированных широкополосных ( $> 8$  нм) лазерных импульсов с характерной длительностью 15-50 пс. Также предложено использовать два последовательно расположенных двулучепреломляющих кристалла для формирования модулированных импульсов.
4. На примере лазерных импульсов с 3D эллипсоидальным распределением интенсивности продемонстрирована возможность высокоэффективной генерации излучения второй и четвертой гармоник с сохранением формы за счет использования углового чирпирования.
5. На примере профилированных чирпированных лазерных импульсов с периодической модуляцией интенсивности во времени продемонстрирована возможность генерации излучения второй и четвертой гармоник с сохранением формы за счет использования у взаимодействующих импульсов частотных чирпов разного знака.
6. Показана возможность управления глубиной модуляции интенсивности у профилированных лазерных импульсов УФ-диапазона за счет изменения длины нелинейного кристалла и интенсивности импульса при преобразовании в четвертую гармонику.
7. Предложено использовать взаимодействие между цилиндрическим и эллипсоидальными импульсами с частотными чирпами разного знака при генерации второй



гармоники для получения квази-конусообразных лазерных импульсов видимого диапазона. Показано, что при определении длительности АКФ спектрально-ограниченных малопериодных импульсов в одноимпульсном автокорреляторе интенсивности второго порядка существуют оптимальные значения толщин кристалла генератора второй гармоники и углов схождения пучков в нем.

### **Достоверность**

Достоверность полученных автором результатов подтверждается хорошим согласованием численных, аналитических и экспериментальных результатов, а также сторонними источниками, приведёнными в списке цитируемой литературы.

Кроме того, достоверность полученных результатов подтверждается публикациями в высокорейтинговых научных журналах, а также их представлением на международных конференциях.

### **Замечания к диссертации**

Работа не лишена ряда недостатков, в частности:

На странице 90 в Заключение по Главе 2 автором утверждается, что в диссертации получена система дифференциальных уравнений, которая описывает трехволновое взаимодействие сверхширокополосных импульсов с длительностью вплоть до одного периода колебаний светового поля. При этом система уравнений 2.17 на стр. 56 получена на основе работы [107], Vrabec et al, PRL 1997, в которой предложен подход приближения медленно меняющегося профиля (Slowly Evolving Wave Approximation), а быстро осциллирующая несущая светового поля не учитывается. К настоящему времени задачи по нелинейной трансформации сверхширокополосных импульсов с расходящимися под большими углами компонентами пространственного спектра описываются однонаправленным уравнением распространения (UPPE, Unidirectional Pulse Propagation Equation, PHYSICAL REVIEW E **70**, 036604 (2004), ссылки в диссертации, по-видимому, нет). Автор диссертации использует для ряда задач, решенных в диссертации, именно UPPE, см. уравнения 2.18, однако также переходит к огибающей поля (уравнения 2.21) и отказывается от быстроосциллирующей несущей. Возникает вопрос, почему генерация, взаимодействие и распространение под существенными углами сверхширокополосного излучения не описывалось автором сразу уравнением UPPE с учетом быстроосциллирующей несущей и большой расходимости? Какие преимущества и недостатки от использования приближения медленно меняющегося профиля (Slowly Evolving Wave Approximation)?

## Заключение

Все указанные замечания носят непринципиальный характер и не влияют на положительную оценку диссертации. Считаю, что содержание работы Кузьмина Игоря Валерьевича и форма ее представления полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации.

Официальный оппонент,  
доцент МГУ им. М.В.Ломоносова  
д.ф.-м.н., профессор

О.Г. Косарева

Физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,  
119991 Москва, Воробьевы горы, д. 1, стр. 2, e-mail: kosareva@physics.msu.ru

Декан  
Физического факультета МГУ  
имени М.В. Ломоносова,  
профессор



Н.Н.Сысоев