



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИФ РАН

Член-корр. РАН

А.М.Сергеев

2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Саакяна Артёма Тиграновича «Генерация второй гармоники излучения лазера на неодимовом стекле с большой угловой и спектральной шириной», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Диссертационная работа А.Т. Саакяна посвящена исследованию процесса генерации второй гармоники (ГВГ) излучения с управляемой когерентностью лазера на неодимовом стекле. Применение излучения на удвоенной частоте с большой угловой и спектральной шириной позволит не только более однородно облучать используемые в качестве мишени вещества, но также проникать и нагревать более плотные слои плазмы, по сравнению с излучением на основной частоте. Важно отметить, что излучение второй гармоники может быть использовано для моделирования процессов в термоядерных мишенях, причём как в качестве греющего излучения, так и в диагностических целях. Однородность облучения термоядерной мишени и равномерное распределение энергии в плазме на сегодняшний день являются одними из важнейших нерешённых проблем лазерного термоядерного синтеза. Таким образом, актуальность тематики диссертационной работы А.Т. Саакяна не вызывает сомнений.

С фундаментальной точки зрения, полученные результаты представляют существенный интерес, поскольку впервые проведено исследование ГВГ в нелинейных кристаллах KDP излучения лазера на неодимовом стекле с большой угловой и спектральной шириной при интенсивности излучения близкой к пробному нелинейного кристалла. Однако здесь следует пояснить термин «большой угловой и спектральной шириной», по-видимому, автор сравнивает эти параметры с угловой и спектральной шириной синхронизма кристалла KDP при заданном поле накачки (хотя режим преобразования явно нелинейный) или это близкие к максимально предельным значениям угловой и спектральной ширине излучения конкретного лазера на неодимовом стекле. Далее этот термин будем использовать с учетом этого замечания.

Создание плазмы излучением второй гармоники позволяет изолировать лазерные каскады от мишени, и тем самым предотвращать разрушение оптических элементов, что подчёркивает практическую ценность работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, изложены цель работы, научная новизна и научно-практическая ценность работы, отмечены достоверность

результатов и личный вклад соискателя. Также во введении представлены выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы и публикациях, структура и объём диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы, экспериментальных и теоретических работ по ГВГ излучения неодимовых лазеров. Обсуждаются результаты наиболее значимых отечественных и зарубежных работ по ГВГ. Кратко описана суть физического процесса ГВГ в нелинейных кристаллах, рассматривается влияние на процесс ГВГ таких параметров излучения первой гармоники как угловая расходимость, ширина спектра, состояние поляризации, а также других факторов. Дано обоснование выбора кристалла KDP для преобразования во вторую гармонику излучения с большой угловой и спектральной шириной мощного широкоапертурного неодимового лазера с наносекундной длительностью импульса. В конце первой главы представлены краткие выводы, в которых отмечено, что на сегодняшний день имеются нерешённые актуальные задачи, связанные с преобразованием во вторую гармонику такого лазерного излучения.

Во второй главе первый раздел посвящён описанию экспериментальной установки по ГВГ. Представлена схема экспериментов по ГВГ, приведены пространственные, угловые, временные и спектральные характеристики многомодового излучения, а также расчёт номинального числа поперечных мод излучения используемого в экспериментах резонатора. Отмечается, что конструкция отдельно резонатора и всего лазера позволяет независимо изменять число поперечных мод, а также ширину спектра. В разделе также перечислены используемые в экспериментах измерительные приборы, оптические элементы и нелинейные кристаллы KDP. Приведено краткое описание специально собранного автором диссертации юстировочного импульсно периодического Nd-YAG лазера для первоначальной (грубой) настройки на направление синхронизма. Изложены использованные методы исследования пространственных, угловых и спектральных свойств излучения второй гармоники, а также излучения основной частоты, прошедшего через кристалл KDP.

Во втором разделе Главы 2 представлены результаты ГВГ излучения с большой угловой и спектральной шириной при реализации взаимодействия *оee*. Представлены экспериментальные зависимости эффективности преобразования от плотности мощности основного излучения, при разных значениях параметров излучения на основной частоте и длины кристаллов. Приведены результаты также и для так называемой «двухкристальной» схемы ГВГ, когда излучение проходит через два последовательно расположенных кристалла. Применение подобной схемы позволило повысить эффективность преобразования в среднем до уровня 30 %, что больше, чем отдельно в каждом из кристаллов. Вместе с экспериментальными представлены результаты теоретической оценки общей эффективности преобразования для классической двухкристальной схемы ГВГ, которые находятся в определенных пределах в достаточно хорошем согласии друг с другом.

Эксперимент по определению лучевой стойкости кристаллов показал, что максимальное значение плотности мощности основного излучения, при котором всё ещё не проявляются какие-либо оптические разрушения внутри или на поверхности кристалла, составляет  $8 \text{ ГВт/см}^2$ . Следует отметить, что для широкоапертурных лазеров наносекундной длительности импульса данное значение является очень высоким.

В конце второго раздела Главы 2 приведены результаты исследования пространственно-угловых характеристик излучения на основной частоте и второй гармонике. В третьем разделе изложены основные выводы к Главе 2.

В третьей главе изложены экспериментальные результаты ГВГ излучения с большой угловой и спектральной шириной при реализации взаимодействия *ооe*. Как и во второй главе представлены экспериментальные зависимости эффективности преобразования от плотности мощности основного излучения, при разных значениях параметров излучения на основной частоте и длины кристаллов. В частности, проведены эксперименты при разных значениях числа поперечных мод в генераторе. Приведены экспериментальные зависимости эффективности преобразования во вторую гармонику от числа поперечных мод в генераторе.

Отмечается, что улучшение параметров основного излучения позволяет почти вдвое повысить эффективность преобразования, однако выходная энергия лазера при этом почти на порядок снижается. Таким образом, для достижения максимальной энергии на частоте второй гармоники следует преобразовывать излучение с менее оптимальными значениями основных параметров. Максимально достигнутое значение эффективности преобразование составило 52 %.

В экспериментах обнаружено, что уменьшение диаметра пучка первой гармоники (путём телескопирования) приводит к улучшению однородности его пространственного распределения, вследствие чего появляется практически постоянная зависимость эффективности преобразования во вторую гармонику во всём интервале плотности мощности излучения накачки.

В третьей главе также представлены результаты исследований зависимости эффективности преобразования от угла отстройки кристалла относительно направления синхронизма, а также результаты пространственно-угловых и спектральных исследований излучений на основной частоте и второй гармонике. В конце третьей главы приведены теоретические расчёты эффективности преобразования и их сравнение с экспериментальными результатами. Заканчивается третья глава кратким изложением основных выводов.

В четвёртой главе описывается экспериментальные исследования интерференционных свойств излучения второй гармоники, обсуждаются полученные результаты. Продемонстрировано, что интерференционная картина имеет хорошую чёткость и достаточную контрастность для корректного применения подобного излучения в оптических методах диагностики лазерной плазмы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и соответствующие им выводы.

Оценивая данную работу А.Т. Саакяна, следует отметить, что полученные оригинальные результаты являются интересными как с фундаментальной точки зрения, так и с прикладной, так как затрагивают различные вопросы нелинейной оптики, физики мощных лазеров, лазерного термоядерного синтеза. Осуществлен очень обширный объём экспериментальных исследований по преобразованию с относительно большой угловой и спектральной шириной излучения мощного лазера на стекле с неодимом. Работа выполнена с большой тщательностью и комплексным подходом при решении поставленной задачи. Автор представил подробный обзор научной литературы по рассматриваемым вопросам. Обосновал несомненную актуальность данной диссертационной работы.

Исследования показали ряд характерных новых особенностей процесса преобразования во вторую гармонику излучения с такими параметрами. Полученные результаты являются оригинальными и достоверными, что подтверждается качеством проведённых экспериментов и воспроизводимостью полученных результатов. Защищаемые положения являются обоснованными.

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, прошли апробацию на многих ведущих иностранных и внутрироссийских конференциях, а также были опубликованы в трёх статьях в рецензируемых журналах, включённых в перечень ВАК РФ. Результаты работы могут быть использованы в институтах РАН, в МГУ, МФТИ, МИФИ и др., где проводятся эксперименты по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом, а также генерации высших оптических гармоник излучения неодимовых лазеров.

По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. При описании работы телескопа Галлилея ( в тексте диссертации он назван коллиматором) автор не заостряет внимание, что кроме сжатия при небольших отстройках от положения софокусности линз, которое не просто измерить из-за малости этой отстройки, телескоп может вносить некоторый регулярный радиус кривизны в проходящий пучок, а следовательно и геометрическую расходимость.
2. Кстати, это имеет прямое отношение к многомодовому выходному пучку лазерной системы, поскольку его угол расходимости указан 1.4 мрад, в то время как радиусу корреляции 0.79 мм, соответствует угол расходимости 0.44 мрад., что явно свидетельствует о присутствии нескомпенсированной средней геометрической расходимости равной  $D/R$  ( $D$ - диаметр пучка,  $R$  – радиус кривизны в излучения)
3. На стр. 49 диссертации есть такой текст: «...обладая высокой когерентностью и гауссовым распределением в дальней зоне... одномодовый пучок лазерного излучения при фокусировке может быть сконцентрирован в пятно, размер которого определяется радиусом  $r$ :  $r = 1.22f(\lambda/D) = 1.22\lambda\{1/(D/f)\}...$ », здесь речь идет о гауссовом пучке при этом диаметр фокусирующей линзы должен быть существенно больше диаметра гауссова пучка  $d_0$ , падающего на линзу, поэтому в данном случае необходимо использовать расходимость для гауссова пучка, т.е.  $1/kd_0$ , где  $k=2\pi/\lambda$ , а не  $1.22 \lambda/D$ , отсюда и дальнейшие оценки будут иные.
4. В диссертации автор повсеместно заменил понятие телескопирование лазерного пучка на коллимирование, что неуместно, т.к используется телескоп Галлилея. При этом под коллимированием он понимает только уменьшение диаметра пучка, что приводит к увеличению расходимости (что верно) и увеличению направленности (что не верно). Направленность с уменьшением диаметра лазерного пучка, как известно, уменьшается.
5. Количественные величины ширины синхронизма, ширины спектра, угловой расходимости, длительности импульса и др. приведены в подавляющем большинстве случаев без указания соответствующего им уровня (0,5,  $1/e$ ,  $1/e^2$ ).
6. Автором проведены очень большие экспериментальные исследования по ГВГ лазерного излучения с большой угловой и спектральной ширинами, исследована

масса различных режимов и был бы очень уместный обобщающий анализ с выводом – какой режим ГВГ наиболее оптимален с точки зрения получения второй гармоники с максимальной мощностью и подходящей многомодовой поперечной структурой для необходимого равномерного облучения мишени.

Эти недостатки не снижают общую положительную оценку работы. В целом, диссертационная работа А.Т. Саакяна выполнена на высоком научном уровне по актуальной и практически значимой теме. Оформление диссертации соответствует установленным требованиям. Автореферат достаточно точно и полно отражает содержание диссертации, и по оформлению также соответствует требованиям ВАК РФ.

Считаем, что диссертация «Генерация второй гармоники излучения лазера на неодимовом стекле с большой угловой и спектральной шириной» соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – А.Т.Саакян, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Доклад А.Т. Саакяна по данной диссертации заслушан 20 мая 2015 года на семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики.

Председатель семинара  
Заместитель директора,  
член-корреспондент РАН



Е. А. Хазанов

Секретарь семинара  
Научный сотрудник,  
к.ф.-м.н.

А. А. Соловьев

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ГСП - 120, ул. Ульянова, 46.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук.

Сайт: [www.ipfran.ru/](http://www.ipfran.ru/); тел.: +7 (831) 436-58-10; факс.: +7 (831) 436-20-61; эл.почта: [swkr@appl.sci-nnov.ru](mailto:swkr@appl.sci-nnov.ru).

Список основных публикаций сотрудников Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), опубликованных за последние пять лет по теме диссертации А.Т. Саакяна «Генерация второй гармоники излучения лазера на неодимовом стекле с большой угловой и спектральной шириной», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

1. А.К. Потемкин, Е.И. Гачева, В.В. Зеленогорский, Е.В. Катин, И.Е. Кожеватов, В.В. Ложкарев, Г.А. Лучинин, Д.Е. Силин, Е.А. Хазанов, Д.В. Трубников, Г.Д. Ширков, М. Курики, and Д. Уракава, "Лазерный драйвер для фотокатода линейного ускорителя электронов " Квантовая Электроника, 40, 1123-1130 (2010).
2. А.В. Коржиманов, А.А. Гоносков, Е.А. Хазанов, and А.М. Сергеев, "Горизонты петаваттных лазерных комплексов," Успехи физических наук, 181, 9–32 (2011).
3. В.Н. Гинзбург, В.В. Ложкарев, С.Ю. Миронов, А.К. Потемкин, and Е.А. Хазанов, "Влияние мелкомасштабной самофокусировки на генерацию второй гармоники сверхсильным лазерным полем," Квантовая Электроника, 40, 503-508 (2010).
4. С.Ю. Миронов, В.Н. Гинзбург, В.В. Ложкарев, Г.А. Лучинин, А.В. Кирсанов, И.В. Яковлев, Е.А. Хазанов, and А.А. Шайкин, "Высокоэффективная генерация второй гармоники интенсивного фемтосекундного излучения при существенном влиянии кубической нелинейности," Квантовая Электроника, 41, 963-967 (2011).
5. M.S. Kuzmina, M. Martyanov, A. Poteomkin, E.A. Khazanov, and A.A. Shaykin, "Theoretical and experimental investigation of laser radiation propagation in a medium with thermally induced birefringence and cubic nonlinearity," Optics Express, 19, 21977-21988 (2011).
6. S.Y. Mironov, V.V. Lozhkarev, V.N. Ginzburg, I.V. Yakovlev, G. Luchinin, A.A. Shaykin, E.A. Khazanov, A.A. Babin, E. Novikov, S. Fadeev, A.M. Sergeev, and G.A. Mourou, "Second-harmonic generation of super powerful femtosecond pulses under strong influence of cubic nonlinearity," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 18, 7-13 (2012).
7. Н. Ф. Андреев, К. В. Власова, В. С. Давыдов, С. М. Куликов, А. И. Макаров, С. А. Сухарев, Г. И. Фрейдман, С. В. Шубин, «Многокаскадные удвоители частоты широкополосного лазерного излучения» Квантовая Электроника, Том 42, № 10, с. 887 - 899, Октябрь 2012  
N.F. Andreev, R.V. Vlasova, V.S. Davidov, S.M. Kulikov, A.I. Makarov, S/A. Sukharev, G.I.Freidman, S.V. Shubin, "Cascaded frequency doublers for broadband laser radiation". Quantum Electronics 42 (10), p.887-898, 2012.
8. A.A. Kuzmin, D.E. Silin, A.A. Shaykin, I.E. Kozhevato, and E.A. Khazanov, "Simple

- method of measurement of phase distortions in laser amplifiers," *Journal of the Optical Society of America B*, 29, 5 (2012).
9. E.I. Gacheva, A.K. Poteomkin, E.A. Khazanov, V.V. Zelenogorskii, E.V. Katin, G.A. Luchinin, N.I. Balalykin, V.F. Minashkin, M.A. Nozdrin, G.V. Trubnikov, and G.D. Shirkov, "Laser Driver for a Photoinjector of an Electron Linear Accelerator (February 2014)," *Ieee Journal of Quantum Electronics*, 50, 522-529 (2014).
  10. A.A. Kuzmin, E.A. Khazanov, O.V. Kulagin, and A.A. Shaykin, "Neodymium glass laser with a phase conjugate mirror producing 220 J pulses at 0.02 Hz repetition rate," *Optics Express*, 22, 20842-20855 (2014).