

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 535.015

МОДУЛИ ЗАЩИТЫ ГЛАЗ ОТ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

© 2013 г. И. М. Белоусова***, доктор физ.-мат. наук; О. Б. Данилов*, доктор физ.-мат. наук; Д. А. Виденичев***, В. М. Волынкин*, канд. хим. наук; Ж. Б. Веденяпина*; И. М. Кисляков***, канд. физ.-мат. наук; Г. А. Муранова*, канд. техн. наук; Т. Д. Муравьева*, канд. хим. наук; А. А. Рыжов***, аспирант

* Научно-производственная корпорация “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: dv@nanophotonica.ru

Представлены результаты разработки модулей защиты глаз от лазерного излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Описываются нелинейно-оптический модуль со средой на основе суспензии углеродных наночастиц в кремнийорганической жидкости, многоспектральный интерференционный фильтр, имеющий узкие полосы отражения с минимальным пропусканием на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, и устройство, адекватное наблюдательным приборам, с внедренными элементами защиты. Комплексное применение модулей защиты позволяет снизить энергию на выходе устройства до уровня не выше 200 пДж при входной энергии 50 мДж и частотах следования импульсов до 10 Гц и обеспечивает, таким образом, безопасность глаз наблюдателя.

Ключевые слова: защита от лазерного излучения, нелинейно-оптические ограничители лазерного излучения, нелинейно-оптические свойства суспензий углеродных частиц.

Коды OCIS: 190.4360, 190.4400, 190.2640

Поступила в редакцию 13.06.2012

Введение

Широкое использование лазеров в научных исследованиях, промышленности, медицине и военной технике делает весьма актуальной задачу защиты глаз и приемников излучения от интенсивного лазерного излучения [1].

Глаза человека наиболее уязвимы в отношении поражения лазерным излучением. Такие свойства лазерного излучения, как когерентность и малая расходимость пучка определяют его высокую опасность для глаз, вследствие этого в глаз проникает излучение большой плотности мощности. Различные компоненты органа зрения по-разному поглощают электромагнитное излучение. Поражения сетчатки глаза является наиболее частой причиной нарушения или потери зрения. В зависимости от

облученности сетчатки могут возникать термические поражения ее слоев, приводящие к кровоизлиянию, и в результате, к временным или необратимым потерям функциональности. Область спектра, в которой сетчатка глаза поглощает практически все излучение, а значит, в ней она наиболее уязвима, лежит в диапазоне от 400 до 1400 нм.

В целях защиты от поражения лазерным излучением широко распространены такие средства как цветные светофильтры, а также стекла с нанесенными интерференционными покрытиями. К преимуществам данных фильтров относятся высокая оптическая плотность – от 3 до 6 в защищаемой области, возможность защиты от непрерывного и импульсно-периодического излучения, работа в параллельных пучках и, следовательно, возможность кон-

структивно простого применения в оптических приборах и для создания очков.

Однако цветные светофильтры обладают селективным поглощением, что изменяет цветовое ощущение человека и недопустимо при выполнении задач, в которых важна идентификация цвета. Что касается интерференционных фильтров, то их коэффициент пропускания зависит от угла падения световой волны, что ухудшает их характеристики при углах, отличных от тех, на которые они рассчитаны. Более того, развитие лазеров с перестраиваемой длиной волны делает эти фильтры абсолютно неэффективными, так как они способны обеспечить защиту только в заранее известном спектральном диапазоне. Еще одной причиной, по которой рассматриваемые фильтры не подходят для использования в ряде областей, является их линейность, т. е. они одинаково уменьшают как слабый, так и мощный сигнал, что не позволяет использовать их, если информационный и поражающий сигналы имеют одинаковую длину волны. Приведенные причины побудили проведение многочисленных исследований в области нелинейно-оптических ограничителей лазерного излучения, которые призваны решить перечисленные выше проблемы.

Нелинейно-оптические ограничители лазерного излучения создаются на основе материалов, обладающих одним или несколькими нелинейно-оптическими свойствами. К таковым относятся обратное насыщенное и двухфотонное поглощение, поглощение свободными носителями заряда, нелинейная рефракция, нелинейное рассеяние. Примерами таких материалов могут служить суспензии различных частиц, красители и другие органические соединения, жидкие кристаллы, фоторефрактивные материалы и др.

Нелинейно-оптические ограничители лазерного излучения работают по принципу пассивной защиты, т. е. управляются проходящим через них излучением. При интенсивности излучения, достаточной для инициирования нелинейно-оптических процессов (порог нелинейности), оптические характеристики материала ограничителя, такие как коэффициент поглощения, показатель преломления, индикатриса рассеяния, изменяются, что приводит к ослаблению входного импульса.

Спектральный диапазон работы ограничителя зависит от спектральной зависимости параметров нелинейно-оптического процес-

са или процессов, происходящих в материале ограничителя. Так, к примеру, раствор фуллерена C_{60} эффективно ограничивает излучение видимой области спектра благодаря большому сечению поглощения из триплетного состояния, однако этот эффект не проявляется в ближней инфракрасной (ИК) области, так как C_{60} в ней имеет очень слабое поглощение и триплетное состояние практически не заселяется.

Большой интерес для создания нелинейно-оптических ограничителей в широком диапазоне (видимая и ближняя ИК области спектра) представляют суспензии углеродных частиц, таких как наночастицы аморфного углерода, астралены, нанотрубки, нановолокна и др. Признанным в литературе механизмом ограничения в данных суспензиях является эффект нелинейного рассеяния [2–6]. Спектр поглощения данных суспензий не имеет особенностей в видимой области, что делает их неокрашенными и не оказывающими влияние на цветовое ощущение. Однако суспензии углеродных частиц не обладают достаточно сильным для обеспечения безопасности глаз эффектом ослабления мощного излучения, поэтому должны применяться для этой задачи в комбинации с другими защитными элементами, в том числе линейными. Кроме того, суспензии углеродных частиц в часто используемых растворителях – воде и этиловом спирте, обладают эффектом увеличения пропускания при частотном режиме воздействия лазерным излучением [7–8]. Таким образом, практическое применение данных суспензий для защиты от импульсно-периодического лазерного излучения возможно при решении этих проблем.

В данной работе представлены результаты по созданию системы защиты, встраиваемой в оптические приборы и обеспечивающей безопасность глаз наблюдателя при попадании в прибор мощного лазерного излучения на частотах повторения до 10 Гц. Данная система защиты состоит из двух модулей.

Первый модуль (НОМ-Ф-1) – нелинейно-оптический ограничитель лазерного излучения на основе композитного состава с углеродными нанотрубками, обеспечивающий защиту в видимом и ближнем ИК диапазонах при частотах повторения импульсов лазерного излучения до 10 Гц.

Второй модуль (НОМ-Ф-2) – линейный многоспектральный интерференционный фильтр с конструкцией, предназначенной для обеспе-

чения защиты в трех наиболее опасных узких спектральных полосах с центрами полос в областях 355, 532 и 1064 нм.

Описание и технические характеристики фильтра НОМ-Ф-1

Наиболее известной средой на основе углеродного материала является, возможно, суспензия на основе аморфных углеродных наночастиц, называемая в зарубежной литературе *carbon black suspension (CBS)* [2–3]. Суспензии нанотрубок, в свою очередь, как однослойные, так и многослойные также интенсивно исследуются в качестве материала для оптических ограничителей [5, 9]. Эти суспензии обладают сравнительно низким порогом ограничения, высоким пропусканием слабого сигнала и равномерным поглощением в видимом и ближнем ИК диапазонах, что позволяет им проявлять значительную нелинейность в этой области спектра и сохранять неискаженным цветное ощущение человека.

Фильтр НОМ-Ф-1 изготавливался на основе суспензии углеродных наночастиц, включающих многослойные углеродные нанотрубки и волокна, полученные из Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. Суспензия неокрашена и однородна, спектр ее пропускания в кювете толщиной 1 см представлен на рис. 1; среднее пропускание в рассматриваемом диапазоне около 70%.

На рис. 2 приведена характерная для этого образца кривая нелинейного пропускания, ко-

торая была записана на длине волны 532 нм второй гармоники YAG:Nd-лазера, работающего в режиме модуляции добротности с длительностью импульса 7 нс. Образец был помещен в фокальную плоскость однократной телескопической системы с относительным отверстием $\approx 1:5$. Излучение, прошедшее через телескопическую систему с образцом, регистрировалось приемником выходной энергии в поле зрения 1,5 мрад.

Как видно из рисунка, образец суспензии в такой оптической системе имеет порог ограничения, определяемый как плотность входной энергии, при которой начинается отклонение пропускания системы от линейного – около 2×10^{-5} Дж/см². Кратность ослабления при входной плотности энергии 0,1 Дж/см², определяемая как отношение пропускания в линейном режиме к пропусканию при входной в телескопическую систему плотности энергии 0,1 Дж/см², составила 2×10^2 . Динамический диапазон работы, определяемый как отношение максимальной плотности энергии на входе в оптическую систему к порогу ограничения, составил 10^4 раз.

Основным механизмом нелинейно-оптического процесса ограничения в средах с углеродными наночастицами считается вынужденное нелинейное рассеяние на неоднородностях, возникающих вследствие поглощения лазерного излучения и последующего нагрева углеродных частиц [2]. Этими неоднородностями, в зависимости от длительности лазерных импульсов и их энергии, могут являться как

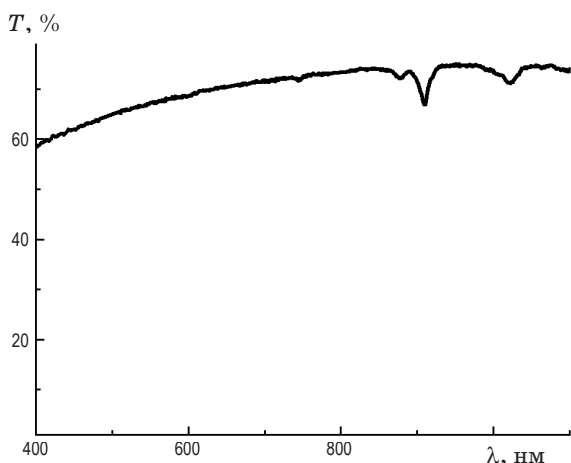


Рис. 1. Спектр пропускания T суспензии углеродных наночастиц в кремнийорганической жидкости, использованной для НОМ-Ф-1.

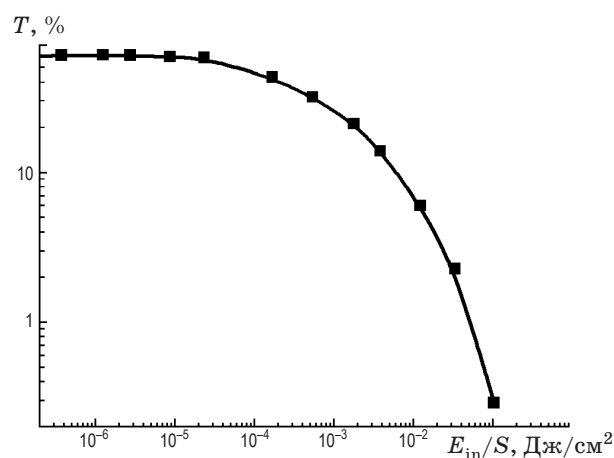


Рис. 2. Кривая нелинейного пропускания суспензии углеродных наночастиц, использованной для НОМ-Ф-1.

расширяющиеся газовые микропузыри, так и расширяющаяся микроплазма.

Эффективность сред в отношении оптического ограничения, работающих по механизму нелинейного рассеяния, сильно зависит от ряда термодинамических характеристик (температуры кипения, плотности, теплоемкости, теплопроводности, поверхностного натяжения) суспензирующей жидкости. Однако устоявшегося мнения, какая именно характеристика имеет ключевое влияние на эффективность жидкофазного ограничителя, на данный момент нет. В одних работах такой характеристикой считается температура кипения [6], в других – поверхностное натяжение суспензирующей жидкости [7]. В задаче обеспечения работы среды при воздействии лазерного излучения в импульсно-периодическом режиме термодинамические характеристики также явно имеют большое значение. Как уже упоминалось, суспензии углеродных частиц в воде и этиловом спирте теряют способность ограничивать излучение большой интенсивности после прохождения нескольких последовательных импульсов при частотах их следования более 0,1–0,5 Гц [8]. Объяснением данного явления может быть истощение канала прохождения лазерного импульса суспензированными частицами вследствие выброса частиц из канала либо их разрушения. Процессы выброса частиц и “восстановления” суспензии также регулируются термодинамическими параметрами среды. В работе [7] исследовался ход кривой нелинейного пропускания в зависимости от вязкости суспензии при частоте повторения лазерных импульсов 10 Гц. В работе делается вывод о решающем влиянии вязкости среды на процесс восстановления суспензии после облучения: чем ниже вязкость среды, тем быстрее происходит ее восстановление, и тем лучше суспензия ограничивает излучение в частотном режиме. Среда, исследованные в работе [7], включали, в порядке увеличения вязкости от 0,2 до 1 мПа с, пентан, сероуглерод, воду, этиловый спирт, ундекан.

Целью настоящего исследования, среди прочих, было достижение удовлетворительной работы создаваемого ограничителя на частотах повторения лазерных импульсов до 10 Гц. Для этого было необходимо подобрать материал с подходящими теплофизическими параметрами. В процессе поиска была найдена двухкомпонентная система (полиметилсилоксановая жидкость–толуол), которая позволяла варьи-

ровать теплофизические и гидродинамические параметры среды в широком диапазоне. Так, например, при изменении вязкости в пределах от 30 до 700 мПа с было обнаружено, что смесь полиметилсилоксановая жидкость–толуол при объемном соотношении 2:1 с вязкостью 75 мПа с обладает подходящими характеристиками и способна эффективно ограничивать импульсно-периодическое лазерное излучение. Механизм устойчивости такой суспензии к частотному излучению пока неясен. Однако можно предположить, что газовый пузырь, образовавшийся во время импульса, не успевает выйти из зоны прохождения пучка за время до следующего импульса и, таким образом, представляет собой рассеивающий центр и для последующих импульсов. Кроме того, фактором, который также может влиять на устойчивость суспензии нанотрубок к импульсно-периодическому воздействию, является чрезвычайная устойчивость углеродных нанотрубок в условиях высоких температур. Экспериментальные результаты, полученные в работе [10], показывают, что многослойные углеродные нанотрубки в вакууме устойчивы к температурам не меньшим, чем 3400 К. В работе [11] теоретический предел температурной устойчивости многослойных углеродных нанотрубок оценивается в 4000 К. Эти обстоятельства позволяют предположить, что углеродные нанотрубки в исследуемой композиции выдерживают лазерное излучение до определенной интенсивности, не разрушаясь. На рис. 3 представлена зависимость плотности энергии вы-

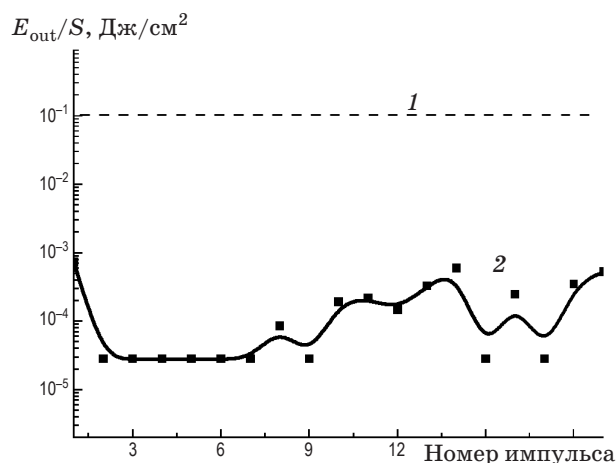


Рис. 3. Уровень входного сигнала E_{in} (1); зависимость плотности энергии E_{out}/S на выходе от номера импульса при частоте их следования 10 Гц (2).

ходного сигнала от номера импульса при частоте следования импульсов 10 Гц и плотности энергии на входе в телескопическую систему 0,1 Дж/см². Как видно, импульсы, следующие за первым, не превосходят его по энергетике, это означает, что увеличение пропускания среды также не происходит. Таким образом, разработанная среда является работоспособной в частотном режиме до 10 Гц.

При варьировании состава выбранной двухкомпонентной системы ее показатель преломления изменялся от 1,39 до 1,5. Данная оптическая среда обладает хорошей прозрачностью и оптической однородностью.

Кроме требований сохранения у человека цветового ощущения неизменным, высокого исходного пропускания, эффективного процесса ограничения и возможности работы в импульсно-периодическом режиме с высокой частотой к ограничителям, которые собираются применять на практике, предъявляются требования по временной и температурной стабильности.

Работоспособность изготовленного фильтра НОМ-Ф-1 обеспечивалась в температурном интервале от -60 до +55 °С, что удовлетворяет условиям использования.

Для обеспечения временной стабильности суспензия заливалась в кювету специальной конструкции, не содержащую металлических деталей и клеевых соединений, находящихся в контакте с суспензией. Фотография кюветы приведена на рис. 4.

Кювета была изготовлена из кварцевого полого цилиндра, имела два кварцевых окна и пробку. Толщина слоя нелинейно-оптического материала составляла 12 мм. Окна кюветы были соединены с кварцевым цилиндром методом глубокого оптического контакта¹, крышка кюветы герметизировалась оптическим клеем. Была изготовлена опытная партия кювет.

Ограничители на основе суспензий углеродных наночастиц могут применяться только в оптических системах, имеющих промежуточное действительное изображение. Размещение кюветы с нелинейно-оптическим материалом в фокальной плоскости объектива обуславливает высокие требования по лучевой прочности к окнам кюветы. В настоящей работе окна кюветы обрабатывались глубокой шлифовкой и полировкой, так что их лучевая

¹ Работы по соединению окон кювет методом глубокого оптического контакта выполнена на ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».



Рис. 4. Фотография кюветы фильтра НОМ-Ф-1.

прочность была не хуже 5 Дж/см² при наносекундной длительности импульсов.

На изобретение способа ограничения оптического излучения, использующего разработанную суспензию, была подана заявка в Роспатент [12].

Описание и технические характеристики фильтра низкоинтенсивного лазерного излучения НОМ-Ф-2

Как видно из рис. 3, нелинейно-оптический фильтр НОМ-Ф-1 ограничивает лазерное излучение до уровня, не достаточного для безопасности органа зрения человека, поэтому необходимо было ввести в конструкцию устройства еще один фильтр.

Анализ работы лазеров, используемых в оптико-электронных приборах в России и за рубежом, показывает отсутствие лазерных систем с плавной перестройкой частоты излучения. Такие лазерные системы находятся на стадии лабораторных исследований и разработок. Вместе с тем, широко применяются лазеры на дискретных длинах волн (1064, 532, 355 нм) в системах дальнометрии, локации, наведения и противодействия.

В связи с этим в разработанном устройстве была создана и использована дополнительно к нелинейно-оптическому ограничителю система, подавляющая лазерное излучение на дискретных длинах волн 1064, 532 и 355 нм.

Для подавления лазерного излучения фиксированных частот традиционно используются интерференционные оптические покрытия. Как правило, это отражающие фильтры, схемы и конструкции которых весьма многочисленны и разнообразны. Используются конструкции из слоев равной оптической толщины, различные неравнослойные конструкции. Для защиты глаз наблюдателя (или фотоэлектрического приемника излучения) от засветки интенсивным лазерным импульсом значение коэффициента отражения фильтров в сравнительно узких областях спектра должно быть близким к единице. Фильтр, обеспечивающий практически полное отражение излучения, будет иметь большую оптическую плотность в заданной полосе частот. Не менее важным является требование высокой прозрачности покрытия вне полосы отражения, так как остальная часть спектра используется для получения информационного сигнала глазом или фотоприемником. Очевидно, что это возможно только при значительном уменьшении ширины полосы отражения зеркала в видимой области спектра. Это требование ведет к значительному усложнению задачи, решение которой находится лишь при условии сочетания оптических модулей зеркал с различной конструкцией слоев и разных порядков.

В основе узкополосного отражающего фильтра НОМ-Ф-2 лежит конструкция интерференционного зеркала (периодическая система чередующихся интерференционных пленок из двух полностью прозрачных материалов с высоким и низким показателями преломления и равной оптической толщиной). Оптическая толщина слоев, как правило, равна четверти длины волны, соответствующей максимальному отражению. Максимальное отражение определяется при этом количеством слоев и разностью их показателей преломления. Спектральное пропускание зеркал в области прозрачности является осциллирующей функцией. Число этих осцилляций зависит от числа периодов системы. Размах осцилляций увеличивается по мере приближения к полосе высокого отражения. Для снижения размаха осцилляций при необходимости повышения пропускания в рабочей области прозрачности с условием сохранения области высокого отражения можно использовать различные конструкции покрытий, например

$$\Pi(0,5ВН0,5В)^k \quad (1)$$

или

$$\Pi(0,5НВ0,5Н)^k, \quad (2)$$

где Π – подложка, В и Н – четвертьволновые пленки с высоким и низким показателями преломления, k – параметр кратности, определяющий общее количество слоев в системе.

Система (1) используется, когда необходимо получить максимально возможную прозрачность с коротковолновой стороны относительно полосы отражения, а конструкция (2) – для получения максимальной прозрачности с длинноволновой стороны.

Для решения поставленной задачи требуется повышение прозрачности системы как с длинноволновой, так и с коротковолновой стороны относительно полосы высокого отражения.

В работе рассматривались две различные основные конструкции фильтров

$$\Pi(В2Н)^k В0,5Н, \quad (3)$$

$$\Pi(3Н3В)^k 1,5Н. \quad (4)$$

Сравнение оптических параметров фильтров (3) и (4) показывает, что при одинаковом количестве и материале слоев остаточное пропускание на длине волны 532 нм системы (4) в 3,5 раза меньше, чем у системы (3). Ширина полосы пропускания системы (4) на 12% более узкая, чем у системы (3). В связи с этим для решения поставленной задачи за основу была выбрана конструкция фильтра (4).

Для повышения прозрачности фильтра в коротковолновой и длинноволновой областях спектра относительно полосы высокого отражения в области 532 нм в основную конструкцию фильтра были введены дополнительные слои, просветляющие соответствующие границы фильтр–подложка и фильтр–воздух в заданных областях спектра

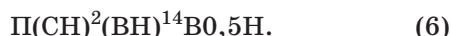
$$\Pi(3С3Н)^2(3В3Н)^{13} 3С3Н3С4Н, \quad (5)$$

где С – четвертьволновый слой со средним показателем преломления.

Спектральная кривая системы (5) имеет максимальную прозрачность в видимой области спектра при глубоком подавлении лазерного излучения на 532 нм. В других областях спектра появляются осцилляции различной интенсивности. Избежать их появления, а также дополнительных пиков отражения можно только усложнением системы путем перехода к трех- и четырехкомпонентным системам. Подобные системы чрезвычайно сложны в из-

готовлении, требуют использования большого количества слоев и обязательного учета и компенсации дисперсии.

Для блокирования лазерного излучения на длинах волн 355 и 1064 нм была использована аналогичная конструкция узкополосного отражающего фильтра, с той разницей, что увеличение прозрачности системы проводилось только с длинноволновой стороны относительно полосы максимального отражения в области 355 нм



Для получения фильтра, блокирующего лазерное излучение, соответствующее длинам волн 355, 532 и 1064 нм, разработанные системы наносились на две стороны подложки. Для слоя с высоким показателем преломления (В) использовался оксид циркония, для слоя со средним показателем преломления (С) – оксид иттрия. Для слоя с низким показателем преломления (Н) был использован кварц.

Среднее расчетное пропускание фильтра НОМ-Ф-2 в видимой области спектра составляет 86,7%, световое (визуальное) пропускание для стандартного источника Д-65 – 63,5%, оптическая плотность на длинах волн 355, 532 и 1064 нм не менее 3,5.

Для увеличения оптической плотности блокирующий НОМ-Ф-2 составлялся из двух фильтров Ф1 на двух подложках из стекла К8, на обе стороны которых наносились рассчитанные оптические системы (5) и (6). В этом случае среднее расчетное пропускание фильтра Ф-1 НОМ-Ф-2 в видимой области спектра составляет 76%, оптическая плотность на длинах волн 355, 532 и 1064 нм не менее 7.

Сравнение теоретического расчетного спектрального пропускания фильтра НОМ-Ф-2 с экспериментальной кривой показано на рис. 5.

Среднее пропускание экспериментального фильтра в диапазоне 380–780 нм составляет 76%, световое пропускание 48%. Снижение спектрального пропускания опытных образцов по сравнению с расчетными значениями вызвано рядом технологических, но не принципиальных, причин. Конструкция такой системы приведена на рис. 6.

В связи с тем, что НОМ-Ф-2 предназначен для работы в параллельных пучках, в качестве насадки или внутри наблюдательных приборов имеющих, как правило, угловое поле не более 10°, можно считать, что блокирующее действие интерференционных фильтров не изменяется.

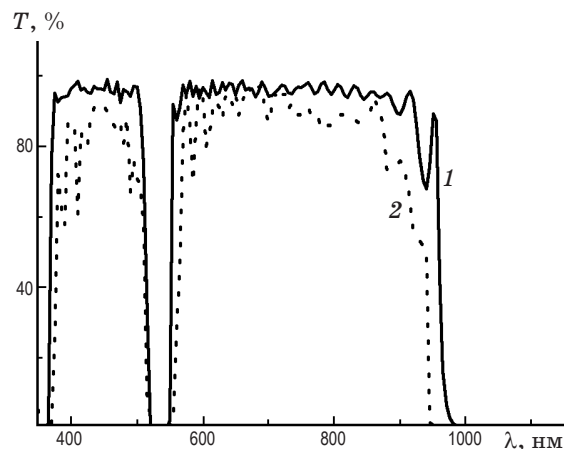


Рис. 5. Расчетное (1) и экспериментальное (2) спектральное пропускание фильтра НОМ-Ф-2.

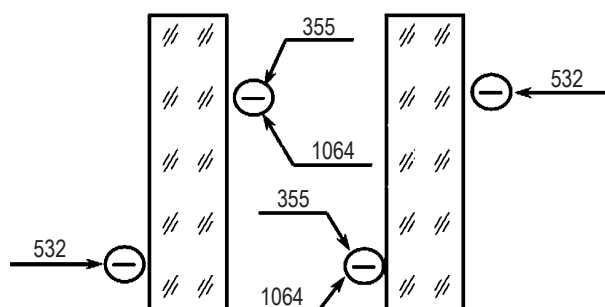


Рис. 6. Конструкция пластин фильтра НОМ-Ф-2.

Фильтр НОМ-Ф-2 может использоваться самостоятельно без нелинейно-оптического фильтра НОМ-Ф-1 в том случае, если необходимо блокировать лазерное излучение относительно невысоких энергий, например, в целях защиты от лазерного излучения измерительных приборов.

Описание и характеристики устройства НОМ, адекватного наблюдательным приборам, с внедренными модулями для защиты

До настоящего времени практически все ограничители, в том числе суспензии углеродных наночастиц, требуют для своего применения установки в фокальную плоскость. В этом смысле хорошо подходит телескопическая система Кеплера увеличительного наблюдательного прибора. Однако при таком применении ограничителей накладывается ряд требова-

ний к стабильности фокальной плоскости системы в отношении длины волны, температуры и углового поля. Толщина ограничителя должна быть как можно меньше для снижения линейных потерь, однако при этом область фокуса должна всегда находиться внутри нелинейно-оптического материала и, кроме того, тонкий ограничитель наиболее подвержен оптическому пробую. Безотносительно к защитным свойствам, внедрение нелинейно-оптических ограничителей в наблюдательные приборы не должно ухудшать качество получаемых ими изображений.

Была сконструирована оптическая телескопическая система со следующими характеристиками: увеличение $1,77\times$, диаметр входного зрачка 24 мм, угловые поля – в пространстве предметов 6° , в пространстве изображений $10^\circ 43'$. Область апохроматизации от 480 до 660 нм. В состав этой оптической системы были включены описанные выше фильтры НОМ-Ф-1 – в фокальную плоскость объектива и НОМ-Ф-2 – в параллельный пучок за окуляром. Оптическая схема рассчитывалась с учетом коэффициента преломления суспензии, при этом обеспечивалось отличное качество изображения; разрешающая способность устройства $7''$. Фотография устройства НОМ приведена на рис. 7.

Для аттестации устройства НОМ были проведены испытания на трех длинах волн лазерного излучения 355, 532 и 1064 нм. Длительность лазерного импульса – 7 нс, апертура пучка – 8 мм ($\approx 0,5 \text{ см}^2$).

Поскольку лучевая прочность кюветы допускает плотность энергии до 5 Дж/см^2 (на передней стенке входного окна) при наносекундных длительностях импульсов, то, исходя из геометрических характеристик телескопической системы, максимальная энергия, подаваемая на вход последней, должна была составлять не более 50 мДж.

Наблюдение выходящей энергии проводилось в угловом поле 1,5 мрад. Данный угол наблюдения является характеристическим для глаза в соответствии с Международным стандартом безопасности лазерных изделий ИЕС 60825. В соответствии с ним, энергия излучения, попадающая в глаз в этом угловом поле в пространстве изображения, не должна превышать заданное значение, а именно 10^{-7} Дж при наносекундной длительности импульса для видимого диапазона и 10^{-6} Дж для ближнего ИК диапазона. Полученная зависимость

выходной энергии от входной для длины волны $\lambda = 532 \text{ нм}$ (рис. 8) демонстрирует работу устройства НОМ.

Как видно из этого рисунка, максимальные значения выходной энергии на 3–4 порядка меньше заданной максимально допустимой энергии. Поэтому возможно использование только одного интерференционного фильтра из двух в сборке НОМ-Ф-2, так как их оптическая плотность составляет три порядка.



Рис. 7. Фотография устройства НОМ.

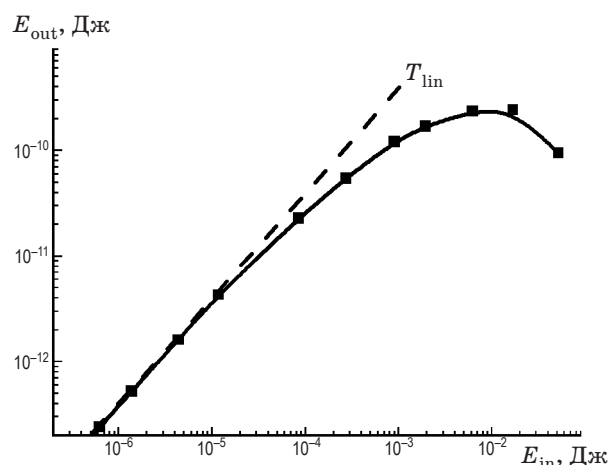


Рис. 8. Зависимость выходной энергии от входной для устройства НОМ на длине волны 532 нм.

Значения энергии лазерного излучения различных длин волн на выходе устройства НОМ

| Длина волны, нм | Выходная энергия, Дж* |
|-----------------|-----------------------|
| 355 | 2×10^{-10} |
| 532 | 2×10^{-11} |
| 1064 | 10^{-10} |

Примечание. *Выходная энергия лазерного излучения в угле наблюдения 1,5 мрад при входной энергии 50 мДж.

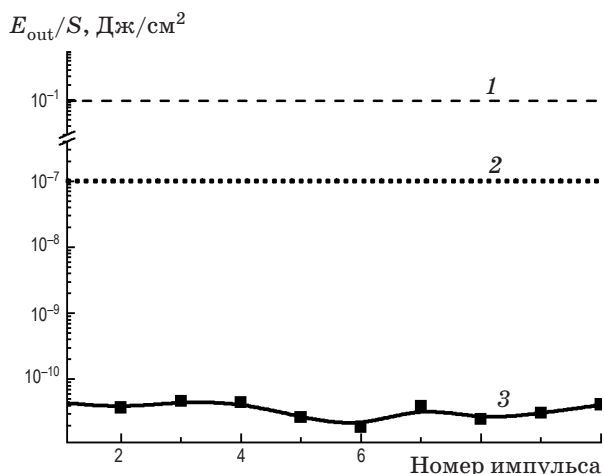


Рис. 9. Уровень входного сигнала – 1, предельно допустимый уровень облученности сетчатки глаза в видимом диапазоне при однократном облучении импульсом наносекундной длительности – 2, плотности энергии на выходе устройства НОМ при импульсно-периодическом режиме воздействия на длине волны 532 нм – 3.

Результаты испытаний устройства НОМ на длинах волн 355, 532 и 1064 нм представлены в таблице. Полученные результаты удовлетворяют требованиям стандарта по лазерной безопасности для данного диапазона длин волн и длительностей импульса.

Работа устройства НОМ в импульсно-периодическом режиме при 10 Гц на $\lambda = 532$ нм проиллюстрирована на рис. 9. Как видно, энергия

каждого последующего импульса не вырастает, т. е. устройство НОМ способно работать на данных частотах повторения импульсов.

Заключение

Результаты разработки и испытаний показали, что модули НОМ-Ф-1 и НОМ-Ф-2 могут быть использованы в наблюдательных приборах широкого назначения для устройств защиты органов зрения от лазерного излучения операторов.

Защитные устройства в совокупности модулей НОМ-Ф-1 и НОМ-Ф-2 могут быть использованы в условиях лазерного воздействия высокой плотности энергии (до 5 Дж/см²) на частотах до 10 Гц включительно в виде съемных насадок на приборы или в составе наблюдательного прибора, в фокусе которого располагается фильтр НОМ-Ф-1, а на выходе в параллельных пучках фильтр НОМ-Ф-2.

При воздействии слабого лазерного излучения с плотностью энергии менее 10⁻³ Дж/см² возможно применение только съемных оптических фильтров НОМ-Ф-2, обеспечивающих в наблюдательных приборах необходимую защиту органов зрения операторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 10-02-05017-б, 11-03-00115-а и 11-03-01106-а. Работа также поддержана ФГУП НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова", стипендия им. С.И. Вавилова.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Sliney D.H. Retinal injury from laser radiation // Proc. First Intern. Workshop Optical Power Limiting. Nonlinear Optics. 1999. V. 21. № 1–4. P. 1–17.
2. Mansour K., Soileau M.J., Van Stryland E.W. Nonlinear optical properties of carbon-black suspensions (ink) // J. Opt. Soc. Am. B. 1992. V. 9. № 7. P. 1100–1109.
3. Nashold K.M., Walter D.P. Investigations of optical limiting mechanisms in carbon particle suspensions and fullerene solutions // J. Opt. Soc. Am. B. 1995. V. 12. № 7. P. 1228–1237.
4. Vincent D., Petit S., Chin S.L. Optical limiting studies in a carbon suspension for subnanosecond and subpicosecond laser pulses // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 15. P. 2944–2946.
5. Vivien L., Anglaret E., Riehl D., Bacou F., Journet C., Goze C., Andrieux M., Brunet M., Lafonta F., Bernier P., Hache F. Single-wall carbon nanotubes for optical limiting // Chem. Phys. Lett. 1999. V. 307. № 5–6. P. 317–319.
6. Mishra S.R., Rawat H.S., Mehendale S.C., Rustagi K.C., Sood A.K., Bandyopadhyay R., Govindaraj A., Rao C.N.R. Optical limiting in single-walled carbon nanotube suspensions // Chem. Phys. Lett. 2000. V. 317. № 3–5. P. 510–514.
7. Hernandez F.E., Shensky III W., Cohanoschi I., Hagan D.J., Van Stryland E.W. Viscosity dependence of optical limiting in carbon black suspensions // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 6. P. 1103–1107.

8. *Belousova I.M., Belousov V.P., Mironova N.G., Murav'eva T.D., Scobelev A.G., Yur'ev M.S., Videnichev D.A.* Fast-acting nonlinear optical limiters and switchers, based on fullerenes and fullerene-like nanostructures // Proc. SPIE. 2007. V. 6455. P. 6455–51.
 9. *Wang J., Blau W.J.* Nonlinear optical and optical limiting properties of individual single-walled carbon nanotubes // Appl. Phys. B. 2008. V. 91. № 3-4. P. 521–524.
 10. *Wei X., Wang M., Bando Y., Golberg D.* Thermal stability of carbon nanotubes probed by anchored tungsten nanoparticles // Sci. Technol. Adv. Mater. 2011. V. 12. № 4. P. 044605.
 11. *Miyamoto Y., Berber S., Yoon M., Rubio A., Tom nek D.* Onset of nanotube decay under extreme thermal and electronic excitations // Physica B: Condensed Matter. 2002. V. 323. № 1–4. P. 78–85.
 12. *Белюсова И.М., Виденичев Д.А., Волынкин В.М., Кисляков И.М., Муравьева Т.Д., Стародубцев А.М.* Способ ограничения интенсивности лазерного излучения // Заявка на патент РФ № 2011131906, приоритет от 28.07.2011 г.
-