



ЛАЗЕРНЫЕ ФОСФАТНЫЕ СТЕКЛА

Ян Чжунмин, д.т.н., О.Милина, ООО "ЛаКом"

Фосфатные стекла применяются для лазерного термоядерного синтеза, лазерного оружия, лазерной локации, оптических волновых усилителей. В статье проанализирована история изобретения и развития лазерного стекла за полвека. Особое внимание уделяется процессу развития китайских фосфатных лазерных стекол, легированных Nd. Дано сравнение свойств мощных фосфатных лазерных стекол, легированных Nd, используемых в устройствах инерционного управляемого термоядерного синтеза (ICF), изготовленных в Китае и в других странах.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ Nd, ПРОИЗВОДСТВА КИТАЯ И ДРУГИХ СТРАН

Интенсивные работы по изучению лазерного термоядерного синтеза требуют создания экспериментальных установок термоядерных реакторов. Специалисты выделяют два направления в создании подобных реакторов. Одно из них основано на использовании высокоомощных лазеров, излучение которых способно испарить материал оболочки мишени. Такие реакторы получили название устройств инерционного управляемого термоядерного синтеза (ICF). Основная техническая проблема, с которой сталкиваются специалисты, работающие в этой области, – это создание эффективного импульсного лазера. Опыты по взаимодействию лазерного излучения с веществом показали, что коэффициент поглощения испаряющегося вещества мишени растет с уменьшением длины волны излучения. Для того чтобы добиться большого термоядерного выхода, необходимо, чтобы при сжатии основная масса топлива оставалась холодной. Таких условий можно добиться только при импульсном характере генерируемого мощного излучения.

Лазерные стекла, используемые в качестве активного элемента лазеров с высокой и средней мощностью излучения, должны обладать определенными спектрально-люминесцентными

параметрами. Их материал должен обладать высоким значением времени затухания люминесценции τ , большим сечением индуцированного излучения, высоким коэффициентом усиления и при этом иметь узкую ширину полосы люминесценции. С этой точки зрения фосфатное стекло, легированное Nd, является перспективным лазерным материалом, поэтому оно широко используется в устройствах ICF. Все исследователи подчеркивают его термооптические характеристики. Минимальный нелинейный показатель преломления n_2 и низкое значение температурного коэффициента изменения показателя преломления dn/dt , достигнутые в фосфатном стекле, легированном Nd, позволяют уменьшать искажения волнового фронта, возникающие при нагревании активного элемента.

Разработка лазеров на фосфатном стекле была начата еще в 70-е годы прошлого века и ведется до сих пор. За этот период были разработаны фосфатные стекла, легированные эрбием, иттербием и неодимом с длинами волн лазерного излучения 1053, 1535 и 1010 нм. В последние десятилетия процесс производства фосфатных стекол получил быстрое развитие – от плавления в одном тигле до непрерывной плавки. При этом размер выплавляемых стекол тоже изменился – от небольших размеров до очень больших (400×800×40 мм). В этих случаях чаще всего используют фосфатное стекло, легированное неодимом, поэтому в последние



несколько десятилетий процесс производства и научных исследований именно неодимового фосфатного стекла достиг высоких результатов.

29 мая 2010 года министерство энергетики США и Ливерморская национальная лаборатория (LLNL) объявили, что в результате 12-летней работы ими построен крупнейший в мире национальный комплекс термоядерных реакций (NIF). На него было потрачено 4 млрд. долларов США. Ожидается, что в 2012 году в нем можно будет наблюдать инерционный термоядерный синтез. Мощность NIF в 60 раз больше, чем у второй по величине в мире подобной установке в Omega University of Rochester в США. Франция создает подобное экспериментальное устройство, которое планирует завершить в ближайшие годы. Это устройство состоит из 192 лазеров на фосфатном стекле, легированном Nd, их суммарная мощность достигает 10^{15} Вт. Россия строит "Марс 6" – устройство лазерного термоядерного синтеза, где планируется использовать 128 лазеров на фосфатном стекле, легированном Nd, строительство должно завершиться в 2014 году. Китай также планирует построить более мощное устройство лазерного термоядерного синтеза, чем существующий ShengGuang III.

Теоретическая разработка лазерных стекол в Китае была начата Ган Фуси в середине 1962 года. Его коллега по лаборатории Цзян Чжуннон отвечал за производство лазерных стекол. В результате 27 апреля 1963 года в активном элементе диаметром 3 см в лазерном стекле с Nd получили излучение на длине волны 1064 нм, а в конце 1963 года выходная энергия лазера составила 1 Дж. В октябре 1964 года они уже имели лазер мощностью 100 Дж. Была сразу поставлена задача получить 1000 Дж, для чего надо было обеспечить согласованную работу нескольких подразделений, которые смогли бы создать крупногабаритные лазерные стекла. Постоянно совершенствуя лазерные свойства, они создали лазер мощностью 1000 Дж в конце этого же года. В 1965 году выходная мощность лазера на фосфатном стекле с Nd достигла 10^4 Дж (при максимальной мощности лазеров в США 7000 Дж).

Позднее Ван Жицзян со своими коллегами создал лазеры, мощность которых достигла 3×10^5 Дж, при длине активного элемента из фосфатного стекла с Nd 5 м, диаметре более 25 см. Однако, так как интенсивность лазерного излучения более не могла увеличиваться, они остановили свои опытно-конструкторские работы по высокомошным лазерным стеклам, легированным Nd. В это же время независимо от них Дэн Симин и Юй

Вэнь достигли большого прорыва в производстве мощных лазеров, разрабатывая свои методы производства лазерного фосфатного стекла.

С 1980 года Китайская Академия наук (КАН) построила крупнейший китайский лазерный центр, затем вице-премьер и министр обороны г-н Чжан Айпин назвал его ShengGuang. После этого КАН начала проводить работы над усовершенствованием лазерного фосфатного стекла именно для целей термоядерного синтеза.

В 1990-е годы с целью удовлетворения требований обновления ShengGuang, КАН разработала N03 (модифицированной версией которого является N31) фосфатное стекло, легированное Nd, которое обладало свойствами, близкими к свойствам фосфатного стекла LHG-5, производимого японской компанией HOYA. Она так же разработала целый ряд фосфатных стекол, легированных Nd, с более низким нелинейным показателем преломления, более высоким сечением вынужденного перехода. Постоянно ведутся исследования по улучшению свойств сырья, уменьшению платиновых включений, усовершенствованию процесса производства. Сейчас разрабатывается процесс непрерывного плавления. Уровень производства лазерных фосфатных стекол, легированных Nd, путем полунепрерывного процесса плавления достиг уровня зарубежных конкурентов.

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ КИТАЙСКИХ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ Nd, СО СТЕКЛАМИ ПРОИЗВОДСТВА ДРУГИХ СТРАН

История мощных лазерных стекол с Nd началось в 1970-х годах с появления силикатных стекол с неодимом, и продолжилась до начала 80-х, когда появилось LHG-5 фосфатное стекло, легированное Nd. Наиболее часто используемыми фосфатными стеклами с Nd в устройствах термоядерного синтеза являются LHG-5 производства HOYA, LG-750 производства Schott, N03 производства Китая, и KGSS-0180, производимое в России. В табл. 1 представлено сравнение свойств этих стекол. По концентрации Nd все перечисленные стекла относятся к среднеконцентрированным лазерным стеклам.

Значение сечения вынужденного перехода Nd в стекле находится в прямой линейной зависимости от вероятности излучательного перехода. Для стекла N31 значение сечения вынужденных переходов $\sigma = 4 \cdot 10^{-20}$ см² и превосходит уровень для всех известных в мире марок стекол данного типа.



Таблица 1. Сравнение свойств лазерных фосфатных стекол, легированных Nd

Параметр	N31	LHG-5	LG-750	KGSS-0180
Концентрация Nd 3+ (10^{-20} ион/см ³)	3,5	3,17	3,5	3,5
Сечение вынужденного перехода, $\sigma/(10^{-20}$ см ²)	4,0	3,6	3,9	3,6
Излучательное время жизни τ_{rad} , мкс	351	365	350	360
Длина генерации λ_L , нм	1053	1053	1052,7	1053
Ширина линии люминесценции $\Delta\lambda_{\text{eff}}$, нм	20,1	26,5	25,4	27
Плотность, г/см ³	2,83	2,83	2,585	2,83
Коэффициент преломления, n_d	1,5389	1,5296	1,5086	1,532
Коэффициент преломления для длины волны генерации	1,5306	1,5201	1,4996	Нет
Число Аббе	65	66,5	68,4	Нет
Нелинейный коэффициент показателя преломления, $n_2/(10^{-13}$ esu)	1,10	1,12	1,02	1,12
Показатель поглощения a_{586} , мм	0,47	0,39	0,42	0,77
Температура плавления, °C	450	485	461	460
Коэффициент линейного расширения, $\alpha(30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C})$, (10^{-7} K ⁻¹)	107	115	116	116
Температурный коэффициент изменения показателя преломления $dn/dT(30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C})$, (10^{-7} K ⁻¹)	-43	-53	-47	-39,5
$dS/dT(30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C})$, (10^{-7} K ⁻¹)	14	6	11	Нет
Коэффициент линейного расширения $\alpha(30^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C})$, (10^{-7} K ⁻¹)	127	127	133,6	Нет
Теплопроводность $k(25^\circ\text{C})$, (Вт/м·К)	0,56	0,58	0,57	Нет
Модуль Юнга / ГПа	56,4	50,1	47,3	59

Ширина полосы люминесценции составляет 20,1 нм и соответствует значению для фосфатных лазерных стекол. Итак, совокупность спектрально-люминесцентных (лазерных) параметров стекла, таких как высокое значение сечения вынужденных лазерных переходов, большой квантовый выход люминесценции при узкой ширине полосы люминесценции, дают основания утверждать, что N31 можно применять в устройствах, требующих больших мощностей. Термооптические характеристики стекла N31 также очень впечатляют: низкие значения нелинейного коэффициента показателя преломления n_2 и температурного коэффициента изменения показателя преломления dn/dT . Для стекла N31 $dn/dT = -43(10^{-7} \text{ K}^{-1})$, что является лучшим результатом для всех известных стекол. Это значит, что минимизированы искажения волнового фронта излучения при нагревании активного элемента в условиях высоких значений мощности излучения, при этом допустимо увеличение предельной плотности мощности излучения в стекле. Это преимущество проявляется в мощных лазерных системах, предназначенных для получения коротких и сверхкоротких импульсов с большой энергией при высокой плотности излучения. Определяющую роль при этом играют нелинейные процессы, процессы самофокусировки.

Значение коэффициента неактивного поглощения $a_{1053} = 0,0015 \text{ см}^{-1}$ находится на уровне мировых производителей SCHOTT, HOYA. Таких показателей можно достичь, используя только очень чистые исходные материалы и высокие технологии.

По сравнению с требованиями, предъявляемыми к обычным оптическим стеклам, требования к лазерным фосфатным стеклам с Nd немного выше. Процесс производства изделий из них включает в себя множество таких этапов, как плавление, литье, отжиг, измерение оптических и лазерных свойств, механическая обработка, нанесение покрытий и многое другое.

В последние несколько десятилетий, в связи с возрастающими требованиями к выходной мощности устройств ICF в России, США, Франции, Китае, растут не только качественные требования к стеклу, но и количественные. Сейчас уже необходимы элементы из лазерного стекла цилиндрической формы с апертурой до 100 мм, в форме пластин размером $460 \times 810 \times 40$ мм и более.

Такие размеры стекол практически невозможно изготовить в условиях плавления в одном тигле. С 1990-х годов SCHOTT и HOYA успешно работали над технологией производства элементов больших размеров. Наконец, после шести лет усилий они



Таблица 2. Сравнение скорости производства и свойств неодимовых фосфатных лазерных стекол в плавильном тигле и при непрерывном плавлении

Особенность	Тигельное плавление	Непрерывное плавление
Производительность	2~3 шт/неделя	70~300 шт/неделя
Астигматизм	0,30 л	0,15 л
Однородность концентрации Nd по всему объему	±5%	±2,5%
Пропускание (1053 нм, толщина 1 мм)	≥99,95%	≥99,95%
Примеси Fe	$<2 \times 10^{-5}$	$<2 \times 10^{-5}$

в 2001 году смогли получить технологию непрерывного плавления лазерного фосфатного стекла с Nd. Использование технологии непрерывного плавления значительно улучшает производительность, качество и согласованность между несколькими блоками установок ICF.

Также при этом оптическая однородность стекол удвоилось, что способствует улучшению качества пучка. Потери света на поглощение длины волны лазерного излучения также значительно снижены.

В табл. 2 приведено сравнение методов производства фосфатных лазерных стекол. Из нее видно, что производительность при непрерывном плавлении в 20 раз выше.

КАН в 1990-х разработала полу непрерывный способ плавления крупногабаритных лазерных фосфатных стекол с Nd, при котором было уменьшено число платиновых включений, увеличена однородность, снижено поглощение. Сейчас, когда имеется уже опыт и необходимое оборудование для производства, специалисты создают элементы цилиндрической формы диаметром до 100 мм и в форме пластин – размером 810×460×40 мм.

В последние годы работы по улучшению свойств фосфатных стекол с Nd продолжают, ведутся НИОКР по разработке непрерывного метода плавления. ■