

Физическая аппаратура

УДК 621.373.826.038

Промышленный лазер на парах меди с генерацией вторых гармоник и суммарной частоты KULON-10Cu-UV

В. М. Батенин, В. Т. Карпухин, М. М. Маликов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Н. М. Лепёхин, Ю. С. Присеко, В. Г. Филиппов, М. В. Гальетов

ООО "Опытно-экспериментальное производство Всероссийского электротехнического института им. В. И. Ленина", г. Истра, Московская обл., Россия

E-mail: priseko@schema5.ru

Н. А. Лябин

ФГУП «НПП "Исток"», г. Фрязино, Московская обл., Россия

Приведены энергетические характеристики промышленного лазера на парах меди (ЛПМ) серии KULON, работающего в режиме высокоскоростной импульсной модуляции в видимом желто-зеленом диапазоне на длинах волн 510 и 578 нм, а также в ультрафиолетовом диапазоне на длинах волн 255, 271 и 289 нм (нелинейное преобразование частоты желто-зеленого диапазона на кристаллах DKDP и BBO) с максимальными средними мощностями излучения 410, 330 и 110 мВт на длинах волн 271, 255 и 289, соответственно. Максимальная средняя мощность излучения лазера накачки (лазера на парах меди) составляет ~10 Вт. При регулировании частоты излучения показана возможность управления энергетическими характеристиками УФ-диапазона.

PACS: 07.50.-e

Введение

Лазерное наноструктурирование твердых тел позволяет существенно изменять их свойства. Примером воздействия ЛПМ, приводящим к наноструктурированию твердых тел, является их абляция [1]. При этом оказывается возможным генерировать наночастицы практически любого материала, например золота, серебра, селенида цинка, олова и т. д.

Управление параметрами лазерного излучения, такими, как длительность импульса, длина волны лазерного излучения, распределение интенсивности лазерного пучка на поверхности мишени, позволяет направленным образом изменять параметры генерируемых наночастиц, моделировать функцию их распределения по размерам, химическому составу и т. д., т. е. получать наночастицы различных материалов с наперед заданными характеристиками [2]. Генерируемые при этом наночастицы металлов могут использоваться, например, как нелинейные оптические переключатели, а возможность изменять структуру и химический состав наночастиц представляет интерес для развития нанотехнологий в медицине, в частности, в области направленной доставки медикаментов в организм человека.

В силу ряда особенностей, подробно рассмотренных в [3], лазерное наноструктурирование твердых тел выполнялось с использованием ЛПМ [1, 2].

Лазеры ультрафиолетового (УФ) диапазона также представляют несомненный интерес для лазерной абляции материалов, например в этаноле, вакууме или газе. Сравнительный анализ показывает, что ЛПМ с преобразованием частоты излучения на нелинейных кристаллах, генерирующие в УФ-диапазоне, имеют ряд преимуществ перед другими источниками лазерного излучения. Например, по сравнению с эксимерными лазерами такие лазеры обладают более высокой частотой следования импульсов генерации (12—15 кГц), большой длиной когерентности (единицы-десятки сантиметров) и малой расходимостью излучения (около 0,2 мрад), а также большим сроком службы и меньшей стоимостью.

По сравнению с твердотельными лазерами, генерирующими четвертую гармонику, такие лазеры имеют большую длину когерентности и меньшую расходимость, а по сравнению с газоразрядными аргоновыми лазерами — большую среднюю и пиковую мощности излучения.

Таким образом, возможность, например, эффективного уменьшения ширины распределения

генерируемых абляцией наночастиц по размерам наилучшим образом достигается при использовании ЛПМ с преобразованием частоты излучения на нелинейных кристаллах.

В настоящее время разработаны и сертифицированы промышленные ЛПМ серии KULON [4] с каналом высокоскоростной импульсной модуляции [5].

Суть способа высокоскоростной импульсной модуляции заключается в изменении условий эффективной генерации лазера за счет регулирования населенности метастабильных лазерных уровней с помощью дополнительного импульса возбуждения, энергия которого достаточна для заселения нижних (метастабильных) лазерных уровней и недостаточна для заселения верхних (резонансных) уровней. При этом методами фазоимпульсного регулирования при работе лазера в режиме сдвоенных импульсов возбуждения путем изменения времени появления дополнительного импульса относительно основного импульса возбуждения достигается режим генерации (при отставании дополнительного импульса от основного) или режим гашения излучения лазера (при опережении дополнительным импульсом основного).

Данный способ управления экспериментально исследован в работе [6] и позволяет осуществлять по любому, наперед заданному, закону высокоскоростную импульсную модуляцию доз излучения ЛПМ с точностью до одного импульса, изменять рабочую частоту следования импульсов генерации от номинального значения (15 кГц) вплоть до моноимпульсного режима, создавать любую последовательность импульсов генерации (с частотой, не превышающей номинальную), а также, что очень существенно для наноструктурирования твердых тел, регулировать длительность импульса генерации лазера от десятков до единиц наносекунд.

Лазер на парах меди с генерацией вторых гармоник (ГВГ) и суммарной частоты разработан на базе промышленного ЛПМ серии KULON, работающего в режиме высокоскоростной импульсной модуляции.

В настоящей работе приведены характеристики излучения промышленного лазера на парах меди KULON-10Cu-UV, работающего как в видимом, так и в УФ-диапазоне.

Устройство и функциональные возможности лазера

Промышленный лазер KULON-10Cu-UV состоит из излучателя и блока питания [5], управляемого от персонального компьютера IBM PC с программным обеспечением, разработанным под

Windows. Оптическая схема излучателя построена по схеме с "острой фокусировкой" [7], которая в наименьшей степени чувствительна к колебаниям параметров лазерного излучения и дает наибольшую стабильность УФ-излучения.

Излучатель лазера состоит из оптического неустойчивого резонатора (НР) с поляризатором излучения, оптической схемы формирования геометрии луча в нелинейном кристалле и оптической схемы разводки лучей разного диапазона длин волн и формирования их геометрии на выходе лазера.

Коэффициент увеличения НР равен $M = 200$, диаметр луча на выходе газоразрядной лазерной трубки — 14 мм (активный элемент LT-10Cu). Для нелинейного преобразования частоты излучения ЛПМ (лазера накачки) использовали кристалл DKDP длиной 40 мм и диаметром 10 мм с углом среза, соответствующего генерации суммарной частоты (ГСЧ) желтой и зеленой линий ЛПМ (длина волны $\lambda = 271$ нм), а также кристалл ВВО длиной 7 мм с поперечным сечением 7×6 мм и углом среза 48°. На кристалле ВВО, кроме ГСЧ, можно осуществлять генерацию вторых гармоник (ГВГ) желтой и зеленой линий излучения ЛПМ (гармоники $\lambda = 255$ и 289 нм) путем угловой перестройки в пределах $\sim 10^\circ$ с помощью микрометрического поворотного стола. Доступ к последнему осуществляется через люк в боковой поверхности корпуса излучателя. Апертура излучения лазера на всех длинах волн составляет ~ 4 мм, поляризация электрического вектора видимого излучения — вертикальная, а в УФ-диапазоне — горизонтальная. Стабилизация температуры нелинейных кристаллов выполняется с помощью термостата.

Функционально возможен как многоволновой режим работы лазера с одновременной генерацией длин волн 510 и 578 нм и одной из следующих: 271 нм (ГСЧ с использованием нелинейного кристалла DKDP); 271, 255 и 289 нм (ГВГ и ГСЧ с перестройкой по длинам волн УФ-излучения с использованием нелинейного кристалла ВВО). Кроме того, при использовании кристалла ВВО возможна оперативная перестройка с одной УФ-волны на другую.

Результаты испытаний

Максимальная средняя мощность излучения ЛПМ (лазера накачки) в ходе эксперимента составляла ~ 10 Вт.

Известно [8], что эффективность нелинейного преобразования частоты излучения зависит в основном от пиковой плотности мощности падающего на кристалл излучения, его расходимости и доли энергии, сосредоточенной в слабосходя-

щаемся пучке лазера, что в свою очередь в большей степени обусловлено коэффициентом увеличения НР. Эксперименты [9] показали, что при коэффициенте увеличения $M \geq 100$ возможно формирование пучка с расходимостью, близкой к дифракционной, но при этом доля энергии в дифракционном пучке мала и для ЛПМ серии KULON не превышает 25 % [4].

Для коэффициента увеличения $M = 200$ влияние рабочей частоты f_{ω} генерируемых импульсов на среднюю мощность P_{Σ} излучения лазера накачки в видимом желто-зеленом диапазоне на длинах волн 510 и 578 нм, а также на среднюю мощность P_{uv} в УФ-диапазоне при ГСЧ на длине волны 271 нм (нелинейный кристалл DKDP) или при ГВГ и ГСЧ с перестройкой по длинам волн 255, 289 и 271 нм (нелинейный кристалл BBO), показано на рис. 1, а, б.

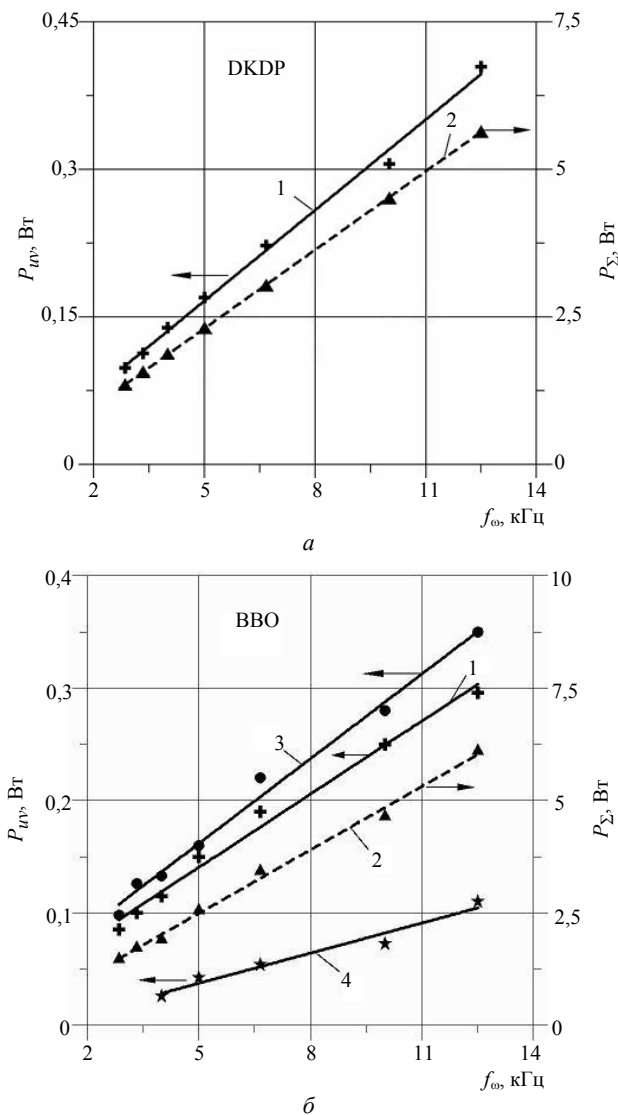


Рис. 1. Влияние рабочей частоты генерируемых импульсов на среднюю мощность излучения лазера KULON-10Cu-UV: а — кристалл DKDP; б — кристалл BBO; 1 — $\lambda = 271$ нм; 2 — $\lambda = 510$ и 578 нм; 3 — $\lambda = 255$ нм; 4 — $\lambda = 289$ нм

Практически линейная зависимость значений средних мощностей излучения лазера KULON-10Cu-UV свидетельствует как о неизменности параметров импульса накачки, так и постоянстве эффективности нелинейного преобразования в кристаллах.

Осциллограммы пиковой импульсной P_{imp} мощности УФ-излучения лазера KULON-10Cu-UV на длине волны 271 нм (нелинейный кристалл DKDP) или на длинах волн 289, 271 и 255 нм (нелинейный кристалл BBO) при изменении рабочей частоты f_{ω} лазера накачки от 12,5 до 2,85 кГц приведены на рис. 2, а, б, откуда, в частности, следует, что импульсная мощность излучения лазера накачки на входе в нелинейный кристалл DKDP или BBO и импульсная мощность УФ-излучения, а следовательно, и КПД преобразования, не изменяются при регулировании рабочей частоты генерируемых импульсов.

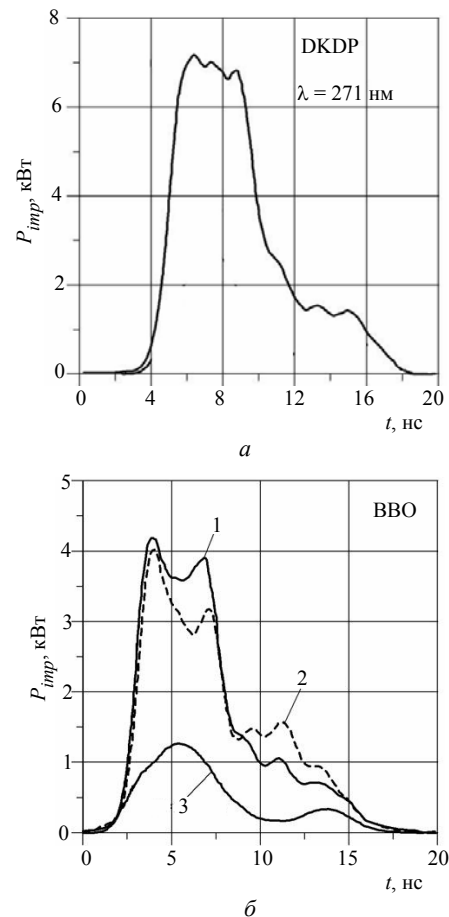


Рис. 2. Осциллограммы пиковой импульсной мощности УФ-излучения лазера KULON-10Cu-UV при изменении рабочей частоты лазера накачки: а — режим ГСЧ на кристалле DKDP; б — режим ГСЧ и ГВГ на кристалле BBO; 1 — $\lambda = 271$ нм; 2 — $\lambda = 255$ нм; 3 — $\lambda = 289$ нм

Для принятой оптической схемы лазера эффективность преобразования излучения ЛПМ наиболее высока для нелинейного кристалла DKDP. Средняя мощность УФ-излучения P_{uv} лазера

KULON-10Cu-UV на длине волны 271 нм в режиме ГСЧ на кристалле DKDP при изменении средней мощности P_{Σ} излучения лазера накачки представлена на рис. 3 и имеет зависимость, близкую к параболической. Последнее обусловлено тем, что от величины импульсного энерговклада зависит не только средняя, но и пиковая мощность излучения ЛПМ, а также соотношение энергий импульсов излучения желтой и зеленой линий генерации, что и определяет эффективность нелинейного преобразования частоты излучения лазера накачки.

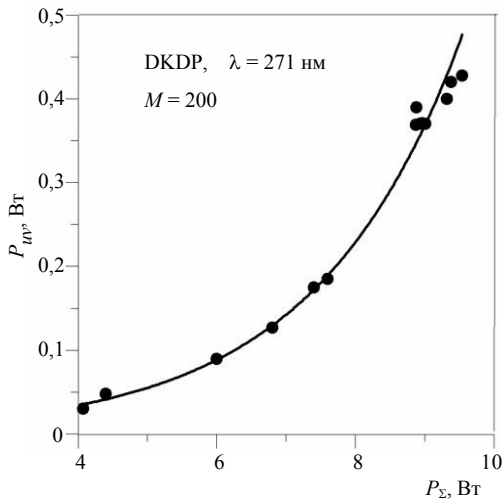


Рис. 3. Средняя мощность УФ-излучения лазера KULON-10Cu-UV на длине волны 271 нм в режиме ГСЧ на кристалле DKDP при изменении средней мощности излучения лазера накачки

В ходе исследования энергетических характеристик лазера были также определены КПД преобразования в кристаллах (DKDP и BBO) как отношение $\eta = P_{uv}/\alpha P'_{\Sigma}$, где P'_{Σ} — средняя мощность поляризованного излучения ЛПМ на двух длинах волн перед входом в кристалл, α -коэффициент пересчета мощности лазера на выходе из НР к мощности на входе в кристалл, учитывающий потери в оптическом тракте (при $M = 200$ коэффициент пересчета $\alpha = 0,9$), а также КПД преобразования принятой оптической схемы лазера KULON-10Cu-UV как отношение $\eta_{uv} = P_{uv}/P_{\Sigma}$.

Энергия импульсов УФ-излучения определялась как отношение средней мощности к рабочей частоте, при которой она была измерена, т. е. $W_{uv} = P_{uv}/f_{\omega}$.

В таблице приведены энергетические характеристики излучения лазера KULON-10Cu-UV.

Тип		λ , нм	P_{uv} , Вт	P_{imp} , кВт	W_{uv} , мкДж	η , %	η_{uv} , %
кристалла	преобразования						
DKDP	ГСЧ	271	0,420	7,3	34	4,9	4,4
	"	271	0,380	4,3	26	3,8	3,5
BBO	ГВГ	255	0,330	4,4	28	7,1	3,7
	"	289	0,110	1,3	9	3,0	1,2

Как показано в [6], при работе лазера в режиме высокоскоростной импульсной модуляции и регулирования длительности импульса излучения ЛПМ, когда длительность "зеленого" импульса по основанию снижается, например до 8 нс, а по полувысоте до 4 нс, то амплитуда импульса излучения уменьшается до значений ~ 2 кВт. В этом случае амплитуда импульса УФ-излучения, а также средняя мощность при нелинейном преобразовании частоты будут достигать значений, которые демонстрируют только возможность оперативного управления длительностью импульса УФ-излучения, но, очевидно, не будут иметь прикладного значения. Поэтому эксперименты по регулированию длительности импульса УФ-излучения не выполнялись.

Внешний вид лазера на парах меди с генерацией вторых гармоник и суммарной частоты KULON-10Cu-UV представлен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид лазера

Ниже приведены основные технические характеристики промышленного лазера KULON-10Cu-UV:

Номинальная частота следования импульсов излучения, кГц.....	12,5
Длины волн излучения для диапазонов, нм:	
зеленого.....	510,6
желтого.....	578,2
ультрафиолетового:	
на кристалле DKDP.....	271
на кристалле BBO.....	255, 271, 289
Максимальное значение средней мощности лазерного излучения для диапазонов, Вт:	
зеленого.....	6,0
желтого.....	4,0
ультрафиолетового:	
на кристалле DKDP.....	0,4
на кристалле BBO.....	0,33
Длительность импульса излучения для диапазонов, по уровню 0,5, нс:	
зеленого.....	10,0
желтого.....	10,0
ультрафиолетового.....	5,0
Апертура излучения на всех длинах волн, мм	4,0
Расходимость излучения ($M = 200$), мрад.....	0,2

Поляризация электрического вектора:	
видимого диапазона.....	вертикальная
УФ-диапазона.....	горизонтальная
Пауза между воздействиями (регулируется от ПК по любому алгоритму), мкс.....	80÷∞
Режим включения.....	автоматический
Охлаждение принудительное.....	воздушное
Гарантийная наработка на отказ, ч, не менее.....	2000
Температура окружающего воздуха, °С.....	15—25
Электропитание от однофазной сети (50 Гц), В.....	220±10 %
Потребляемая мощность, кВт, не более.....	3,0
Габаритные размеры, мм:	
излучателя.....	1250×560×185
источника питания.....	1250×390×185
Масса, кг, не более:	
излучателя.....	65
источника питания.....	55
Электробезопасность.....	соответствует ГОСТ 12.1.019
Лазерная безопасность.....	соответствует ГОСТ Р50723 (Класс 3Б)
Климатическое исполнение.....	УХЛ 4.2 по ГОСТ 15150

Заключение

Импульсная мощность излучения лазера накачки на входе в нелинейный кристалл, импульсная мощность УФ-излучения и эффективность нелинейного преобразования не изменяются при регулировании рабочей частоты генерируемых импульсов.

Таким образом, режим высокоскоростной импульсной модуляции, применяемый в ЛППМ серии

KULON, позволяет эффективно управлять средней мощностью УФ-излучения.

Разработанная оптическая схема лазера KULON-10Cu-UV по нелинейному преобразованию частоты излучения ЛППМ на нелинейных кристаллах DKDP и BBO проста в техническом исполнении и позволяет достигать сравнительно высоких значений средних мощностей УФ-излучения, приемлемых для успешного использования как в области наноструктурирования твердых тел, так и прецизионной микрообработки материалов.

Л и т е р а т у р а

1. Бозон-Вердюра Ф., Байнер Р., Воронов В. В. и др.// Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 8.
2. Изгалиев А. Т., Симакин А. В., Шафеев Г. А.//Там же. 2004. Т. 34. № 1.
3. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. — М.: Физматлит, 2005. — 312 с.
4. Лепехин Н. М., Присеко Ю. С., Филиппов В. Г. и др.// Прикладная физика. 2005. № 1. С. 110—115.
5. Лепехин Н. М., Присеко Ю. С., Филиппов В. Г.//Там же. 2006. № 1. С. 8—14.
6. Лепехин Н. М., Присеко Ю. С., Филиппов В. Г., Карпухин В. Т. и др.//Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 8.
7. Карпухин В. Т., Маликов М. М.//ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 87—89.
8. Карпухин В. Т., Конев Ю. Б., Маликов М. М.//Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 9.
9. Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. и др.//Там же. 1977. № 4. С. 1325.

Статья поступила в редакцию 18 сентября 2008 г.

The industrial laser on copper vapors with generation of the second harmonics and total frequency KULON-10Cu-UV

V. M. Batenin, V. T. Karpukhin, M. M. Malikov

Incorporated Institute of Heats of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

N. M. Lepikhin, Yu. S. Priseko, V. G. Philippov, M. V. Galyetov

ООО "ОЕР ВЕИ", Istra, Moscow region, Russia

E-mail: priseko@schema5.ru

N. A. Lyabin

FGUP «NPP "Istok"», Fryasino, Moscow region, Russia

Power characteristics of the industrial laser on steams of copper of series KULON, working in a mode of high-speed pulse modulation in visible yellow-green range on lengths of waves of 510 and 578 nm, and also in an ultraviolet range on lengths of waves 255, 271 and 289 nm (nonlinear transformation of frequency yellow-green a range on crystals DKDP and BBO) with the maximum average capacity of radiation on length of a wave of 271 nm equal 410 mW, on length of a wave of 255 nm — 330 mW on length of a wave of 289 nm — 110 mW are resulted. The maximum average capacity of radiation of the laser of a rating (the laser on copper vapors) makes ~10 W. Experimentally, at regulation of frequency of radiation, management possibility is shown by power characteristics of the UV-range.