

Лазер на $YAG:Nd^{3+}$ с диодной накачкой, работающий в режиме модуляции добротности в широком интервале температур без термостабилизации диодов накачки*

А.Е.Вайншенкер, А.В.Виленский, **А.А.Казаков**, Б.Г.Лысой, Л.К.Михайлов, В.А.Пашков

Представлены результаты разработки и исследования макетного образца малогабаритного лазера на кристалле $YAG:Nd^{3+}$ с малым энергопотреблением и энергией моноимпульсов 20 мДж при частоте их следования (в циклическом режиме) до 20 Гц и с длиной волны излучения 1064 нм. Лазер предназначен для работы в диапазоне внешних температур от -40°C до 50°C . Задача решалась путем использования квазипродольной полупроводниковой накачки без термостабилизации лазерных диодов.

Ключевые слова: лазер на $YAG:Nd^{3+}$, диодная накачка.

Одно из преимуществ использования для накачки твердотельных лазеров полупроводниковых лазерных диодов вместо импульсных газоразрядных ламп состоит в снижении энергопотребления и, как следствие, в уменьшении массогабаритных параметров электронных блоков питания и управления лазером, а также источников его питания. Кроме того, благодаря значительному уменьшению тепловыделения в источнике излучения накачки и в активном элементе в большинстве случаев удается отказаться от жидкостного охлаждения элементов лазера.

Однако длина волны существующих мощных лазерных диодных излучателей существенно зависит от температуры гетероперехода лазерного диода, которая меняется, в том числе и из-за саморазогрева гетероперехода. Так, изменение температуры гетероперехода на 100°C приводит к смещению спектральной линии излучения примерно на 25 нм. В то же время в традиционной области накачки вблизи 808 нм типичная ширина интенсивной линии поглощения иона Nd^{3+} в кристалле YAG составляет ~ 1 нм. В силу этого, как правило, приходится термостабилизировать лазерные диоды накачки, что ведет к значительному увеличению массы, габаритов и энергопотребления изделий.

Ниже представлены результаты разработки и исследования малогабаритного лазера на $YAG:Nd^{3+}$ с малым энергопотреблением и энергией моноимпульсов свыше 20 мДж при частоте их следования (в циклическом режиме работы) 20 Гц. Лазер работает в широком интервале температур без применения термостабилизации лазерных диодов накачки. Принципиальную возможность отказа от термостабилизации демонстрирует рис.1, на котором приведен спектр поглощения кристалла $YAG:Nd^{3+}$ в окрестности интенсивной линии с длиной волны $\lambda = 808$ нм, обычно используемой для полупроводниковой накачки.

* Доложена на конф. «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2012 г.

А.Е.Вайншенкер, А.В.Виленский, А.А.Казаков, Б.Г.Лысой, Л.К.Михайлов, В.А.Пашков. ОАО «НИИ «Полус» им. М.Ф.Стедьмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: levnikhai@mail.ru

Поступила в редакцию 24 октября 2012 г.

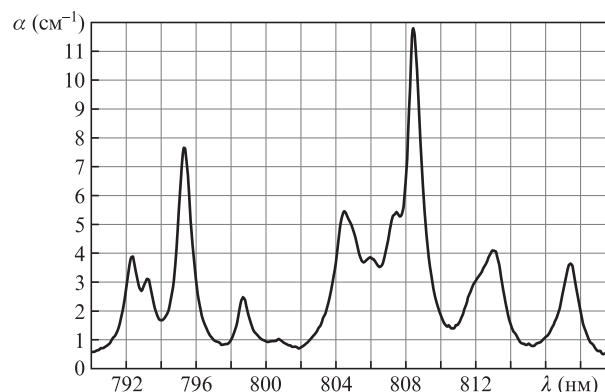


Рис.1. Спектр поглощения ионов Nd^{3+} в кристалле YAG .

Из рис.1 видно, что коэффициент поглощения $YAG:Nd^{3+}$ не меньше 0.5 см^{-1} в диапазоне длин волн 790–820 нм, который соответствует диапазону смещения длины волны излучения лазерных диодов накачки при изменении их температуры на 100°C . Таким образом, использование продольной накачки и активного элемента $YAG:Nd^{3+}$ длиной ~ 5 см должно обеспечивать эффективность поглощения ионами Nd^{3+} излучения накачки, распространяющегося вдоль этого элемента, не ниже 90% во всем рассматриваемом диапазоне длин волн.

Излучение накачки вводится в торец активного элемента в широком диапазоне углов падения. Полированная боковая поверхность активного элемента может обеспечить волноводное распространение излучения накачки вдоль него. Однако в режиме модуляции добротности отражение от полированных боковых поверхностей препятствует накоплению достаточной инверсной населенности из-за возникновения паразитной генерации внутри активного элемента. Обычно от паразитной генерации избавляются матированием боковой поверхности. Но при торцевом вводе излучения накачки большая часть вошедших лучей не распространяется вдоль активного элемента, а падает на его шероховатую боковую поверхность и за счет рассеяния выходит из него. Избавиться от паразитной генерации удается также, применяя активный эле-

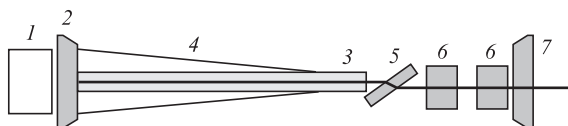


Рис.2. Оптическая схема лазерного излучателя (обозначения см. в тексте).

мент $YAG:Nd^{3+}$ с оболочкой, поглощающей излучение на $\lambda = 1064$ нм и пропускающей излучение накачки [1].

Для повышения эффективности накачки при использовании в лазерном излучателе активного элемента с матированной боковой поверхностью была применена схема так называемой квазипродольной накачки (один из вариантов этой схемы представлен, например, в [2]). Оптическая схема лазерного излучателя приведена на рис.2.

Излучение матрицы лазерных диодов накачки 1 вводится в активный элемент 3 твердотельного лазера через зеркало резонатора 2. Коэффициент отражения этого зеркала на длине волны генерации близок к 100%, а в диапазоне $\lambda = 790-820$ нм он мал (пропускание составляет не менее 95% для всего диапазона углов падения излучения накачки). Активный элемент $YAG:Nd^{3+}$ имеет длину 5 см и диаметр 3 мм, а матрица – излучающую площадку размером 4×10 мм с мощностью излучения до 2 кВт и длиной волны 800 нм при комнатной температуре. Часть излучения матрицы попадает непосредственно в торец активного элемента, большая часть излучения, выходящего через боковую поверхность элемента, вновь направляется в него полым посеребренным коническим концентратором 4. Следует отметить, что указанный концентратор позволяет не только реализовать эффективную квазипродольную накачку, но и существенно уменьшить длину излучателя по сравнению с типичными концентраторами [3] для чисто продольной накачки. Четвертьволновый электрооптический затвор 6 размещен между выходным зеркалом 7 и тонкопленочным интерференционным поляризатором 5. Элементы оптической схемы размещены в закрытом титановом корпусе. Масса излучателя равна 200 г, а его габаритные размеры составляют $33 \times 39 \times 126$ мм. Внешний вид излучателя показан на рис.3.

Электроника лазера состоит из генератора импульсов тока (ГИТ) для питания матрицы лазерных диодов и блока управления затвором (БУЗ) излучателя.

Принцип действия ГИТ основан на частичном разряде емкостного накопителя энергии в виде батареи алюминиевых электролитических накопительных конденсаторов с малым эквивалентным последовательным сопротивлением (low ESR) через двухканальный высокочастотный импульсный регулятор тока.

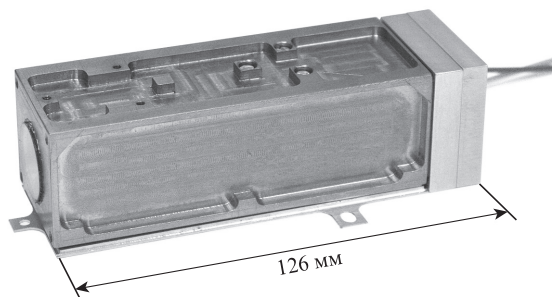


Рис.3. Внешний вид излучателя.

В более распространенных ГИТ с частичным разрядом накопителя через управляемый непрерывный регулятор тока почти весь объем ГИТ занят батареей конденсаторов. ГИТ с высокочастотным импульсным регулятором тока позволяет значительно повысить напряжение на накопителе (что увеличивает удельную энергоемкость конденсаторов) и одновременно уменьшить полную энергию накопителя. В результате нам удалось уменьшить суммарный объем конденсаторов, по крайней мере, в 2–2.5 раза по сравнению с ГИТ с непрерывным регулятором тока разряда. Выходной ток ГИТ регулируется в диапазоне от 200 А и менее до 350 А, напряжение на нагрузке – в диапазоне 15–20 В. Длительность импульса тока регулируется в диапазоне 70–220 мкс, длительность его фронта – в диапазоне 5–10 мкс (растет с ростом тока). Выходная энергия в импульсе составляла до 1 Дж, а максимальная средняя мощность нагрузки – 20 Вт.

Принцип действия БУЗ основан на коммутации высокого напряжения в цепи лазерного затвора транзисторным ключом. БУЗ обеспечивает постоянное и импульсное напряжение от 0.5 до 1.6 кВ и длительность фронта ~ 10 нс. Его габаритные размеры – $109 \times 33 \times 15$ мм.

Питание ГИТ и БУЗ осуществлялось от источника нестабилизированного постоянного напряжения. Рабочий диапазон напряжений – от 10 до 17 В. Суммарный объем ГИТ и БУЗ – около 200 см^3 , рабочий диапазон их температур – от -40°C до 60°C .

Проведенные испытания лазера показали, что при энергии накачки 260 мДж (мощность излучения матрицы лазерных диодов 2 кВт и длительность импульса накачки 130 мкс) энергия моноимпульса достигала 35 мДж. Дальнейшее увеличение энергии накачки и, следовательно, энергии импульса лазерного излучения могло приводить к лазерному разрушению элементов внутри резонатора, в первую очередь менее стойкого электрооптического затвора. Длительность моноимпульса составила 5–7 нс, расходимость – 3 мрад. Следует отметить, что данные испытания проводились в комнатных условиях как в режиме одиночных импульсов накачки, так и при частоте их следования 2 Гц. Длина волны излучения накачки фиксировалась скоростным спектрометром, причем было установлено, что при частоте следования импульсов 2 Гц в рассматриваемом режиме она изменялась от 800 до 802.5 нм из-за саморазогрева матрицы. Таким образом, как следует из рис.1, реализованная нами схема накачки позволила получить приемлемые результаты в одной из критических точек указанного участка спектра, а именно в точке, соответствующей минимуму коэффициента поглощения. При увеличении частоты следования импульсов лазер работал в циклическом режиме. При частоте следования импульсов 20 Гц в данной конструкции лазера энергия моноимпульсов не уменьшалась ниже 20 мДж при продолжительности цикла до 60 с. Типичная зависимость выходной энергии лазера, работающего на частоте 20 Гц, от времени показана на рис.4.

Работу излучателя, помещенного в камеру с регулируемой температурой, демонстрирует рис.5. Длина волны излучения накачки измерялась скоростным спектрометром. Также для наглядности на рис.5 приведен спектр поглощения ионов Nd^{3+} в кристалле YAG . Видно, что рабочая температура, при которой энергия излучения лазера уменьшается до 10 мДж, составляет примерно -30°C . Снижение энергии излучения очевидно вызвано выходом длины волны излучения накачки за пределы коротковолнового края

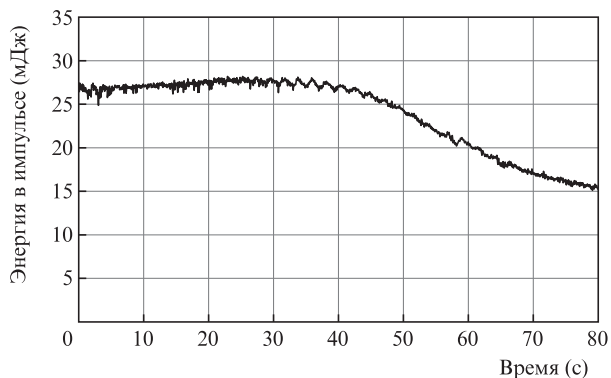


Рис.4. Типичная зависимость выходной энергии лазера от времени при частоте следования импульсов 20 Гц.

полосы поглощения неодима, поскольку длина волны излучения диодной матрицы при комнатной температуре (20°C) находилась вблизи 800 нм. Следует ожидать, что при исходной длине волны излучения матрицы ~805 нм лазер будет работать и при температуре -40°C.

Таким образом, использование полупроводниковой квазипродольной накачки позволяет создавать малогабаритные лазеры на YAG:Nd³⁺ (масса ~0.5 кг) с энергией импульсов излучения более 20 мДж и частотой их следования 20 Гц (в циклическом режиме) без термостабилизации

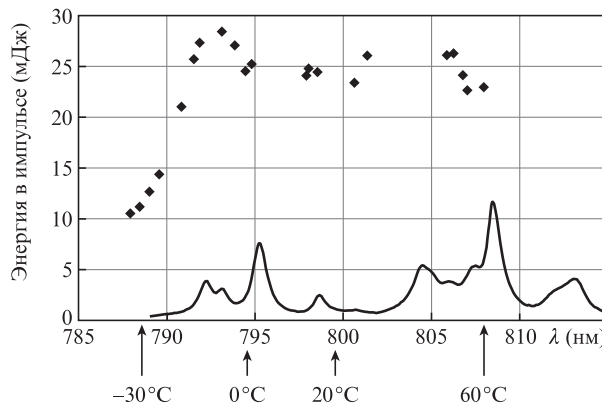


Рис.5. Выходная энергия лазера в зависимости от длины волны излучения накачки (точки) и спектр поглощения YAG:Nd³⁺ (кривая).

лазерных диодов накачки в широком диапазоне температур.

1. Huß R., Wilhelm R., Kolleck C., Neumann J. *Opt. Express*, **18** (12), 13094 (2010).
2. Yuan G., Chong T.C., Xu B. *Appl. Opt.*, **37** (18), 3971 (1998).
3. Shilling B.W., Chinn S.R., Hays A.D., Goldberg L., Trussell C.W. *Appl. Opt.*, **45** (25), 6607 (2006).