

Влияние нагрева на оптические свойства легированных ионами Yb^{3+} волоконных световодов и лазеров на их основе

Д.А.Грух, А.С.Курков, В.М.Парамонов, Е.М.Дианов

Исследовано влияние нагрева на оптические свойства волоконных световодов, легированных ионами Yb^{3+} . Показано, что изменение температуры активной среды влияет на эффективность генерации волоконных лазеров, причем характер и степень влияния существенно зависят от длины волны генерации. Предложено использовать нагревание для повышения эффективности лазеров, излучающих в области 1.15–1.2 мкм.

Ключевые слова: активные волоконные световоды, Yb^{3+} -волоконный лазер.

1. Введение

В последнее время активно разрабатываются и исследуются мощные волоконные лазеры на основе световодов, легированных ионами Yb^{3+} , с накачкой в оболочку [1, 2]. Такие устройства находят применение в волоконных линиях связи для накачки ВКР-конверторов [2, 3], они также могут использоваться в обработке материалов, медицине, лазерных измерителях дальности и т. п., при этом естественным требованием к ним является стабильность выходной мощности лазера. Одним из источников вариаций выходной мощности может явиться изменение температуры активной среды лазера вследствие как изменения внешней температуры, так и нагрева световода из-за наличия избыточных оптических потерь на поглощение. Последний фактор особенно важен для мощных волоконных лазеров, поскольку в этом случае даже небольшие оптические потери могут вызвать заметный нагрев световода.

Поскольку спектральный диапазон генерации Yb^{3+} -лазера и стабильность его выходных характеристик зависят от спектров поглощения и люминесценции ионов иттербия в материале световода [4,5], представляет интерес исследование влияния температуры на оптические свойства активных световодов. Практическое значение имеет исследование влияния нагрева на характеристики лазеров на основе иттербиевого активного световода с двойной оболочкой и с накачкой от полупроводникового источника.

2. Энергетические уровни ионов иттербия в кварцевом стекле

Энергетическая схема уровней ионов иттербия очень проста. Помимо основного уровня $^2F_{7/2}$ существует единственный возбужденный уровень $^2F_{5/2}$, так что использо-

вание переходов между этими уровнями в качестве лазерных является возможным только благодаря сильному штарковскому расщеплению. Схема уровней иона Yb^{3+} представлена на рис.1,а [4]. Спектры поглощения световодов, легированных ионами Yb^{3+} , определяются электронными переходами между расщепленными уровнями и характеризуются наличием сложной полосы поглощения. Узкая линия поглощения с центром на 976 нм соответствует переходу с подуровня а на подуровень е. Линия с центром в области 915 нм соответствует переходам с подуровня а на подуровни f и g. Поглощение в полосе с центром на 1034 нм соответствует переходам с подуровня b. Соответствующий спектр поглощения представлен на рис.1,б.

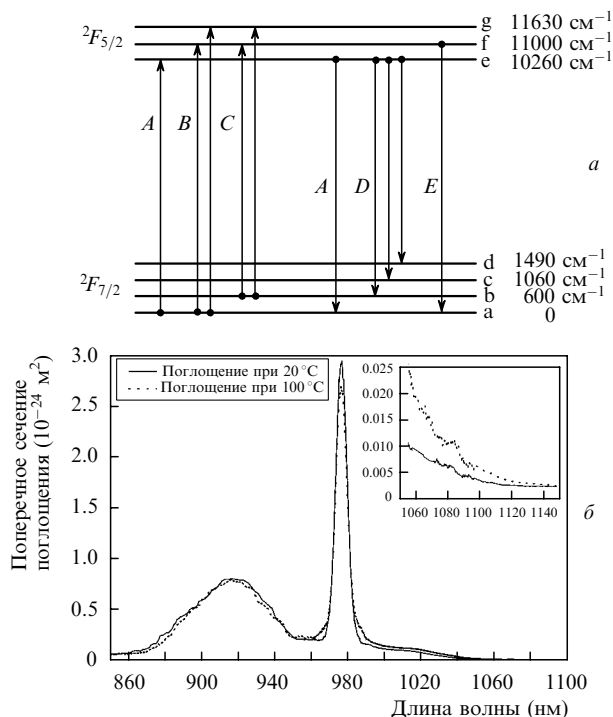


Рис.1. Энергетическая схема ионов Yb^{3+} (а) и спектральная зависимость сечения поглощения в сетке кварцевого стекла для двух температур (б). На вставке показано поведение сечения поглощения при $T = 20^\circ\text{C}$ и 100°C в длинноволновой области.

Д.А.Грух, А.С.Курков, В.М.Парамонов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: rayoflight@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 29 декабря 2003 г.

Полоса люминесценции состоит из узкой линии с центром на 976 нм, что соответствует переходу с подуровня *e* на подуровень *a*, и линии с максимумом на 1034 нм, простирающейся примерно до 1200 нм, что соответствует переходам с подуровня *e* на подуровни *b*, *c* и *d*.

По литературным данным сечения поглощения и люминесценции в максимуме практически совпадают и составляют $2.5 \times 10^{-24} \text{ м}^2$ [4]. На вставке к рис.1,б показана спектральная зависимость сечения поглощения в области 1.06–1.2 мкм. Измерение проводилось с использованием отрезков активных световодов различной длины и концентрации ионов Yb^{3+} . Следует отметить, что, хотя по абсолютной величине сечение поглощения в этой спектральной области невелико, тем не менее для световодов с двойной оболочкой оно является существенным. Это объясняется тем, что в таких структурах коэффициент поглощения накачки определяется не только сечением поглощения и концентрацией активных ионов, но и соотношением площадей активированной сердцевины и внутренней оболочки. В результате поглощение накачки уменьшается в сотни раз по сравнению со случаем накачки в сердцевину, поэтому степень инверсии, как правило, меньше 50%. В то же время, перепоглощение лазерного излучения проявляется в полной мере, т. к. оно распространяется лишь в сердцевине световода.

Изменение спектров поглощения и люминесценции при нагревании определяется изменением населенности *i*-го подуровня в соответствии с распределением Больцмана

$$\frac{N_i}{N} = \frac{\exp(-E_i/kT)}{\sum_i \exp(-E_i/kT)},$$

где *N* – общее число частиц. На рис.2 показаны результаты расчета распределения Больцмана по подуровням основного состояния иона Yb^{3+} в зависимости от температуры. Таким образом, при нагревании следует в первую очередь ожидать изменения спектров поглощения, т. к. с увеличением температуры уменьшается населенность основного подуровня *a* и при этом увеличивается населенность подуровня *b*, что приводит к изменению не только поглощения излучения, но и к качественному изменению спектра поглощения на разных длинах волн.

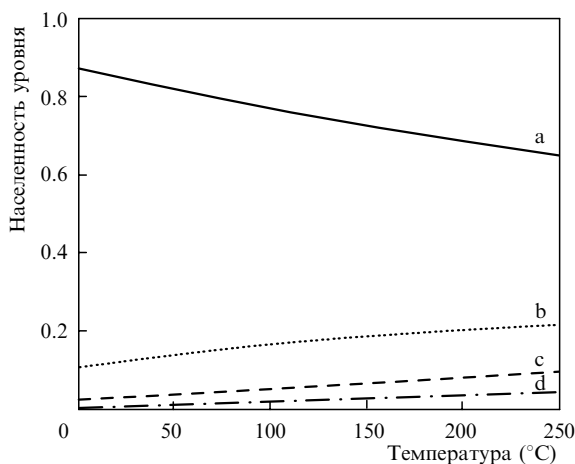


Рис.2. Зависимость распределения населенности подуровней основного состояния от температуры иона Yb^{3+} .

Спектр люминесценции в области длин волн более 1 мкм при нагревании изменяться не должен, т. к. все излучательные переходы происходят с одного подуровня *e*.

3. Влияние нагрева на спектры поглощения и люминесценции

Эксперименты по изучению влияния нагрева на спектры поглощения проводились с несколькими алюмосиликатными световодами, легированными ионами Yb^{3+} , отличающимися концентрацией легирующей примеси, диаметром сердцевины и формой оболочки. Это позволило провести исследование в широком спектральном диапазоне. Данные, полученные для различных образцов, «сшивались» на границах исследованных спектральных интервалов.

Спектры поглощения алюмосиликатного световода, легированного ионами Yb^{3+} , измеренные при температурах 20° и 100 °С показаны на рис.1. Хорошо видно, что изменение поглощения при увеличении температуры соответствует изменению населенности уровней. Так, поглощение на длине волны 976 нм уменьшается при увеличении температуры, т. к. уменьшается населенность подуровня *a* основного состояния. Также уменьшается поглощение в полосе с центром на 915 нм, что соответствует уменьшению населенности подуровня *a* основного уровня и увеличению населенности подуровней *f* и *g* возбужденного состояния. В то же время поглощение в полосе с центром на 1034 нм увеличивается, т. к. при увеличении температуры значительно увеличивается населенность подуровня *b* основного уровня. Возрастает также поглощение в длинноволновом крае этой полосы.

На рис.2 показаны результаты расчета распределения Больцмана по подуровням основного состояния иона Yb^{3+} в зависимости от температуры. Изменение поглощения полностью соответствует полученным результатам.

Необходимо отметить, что при изменении температуры изменяется не только абсолютная величина поглощения на фиксированных длинах волн, но также и отношение коэффициентов поглощения на разных длинах волн, что имеет большое значение при создании лазера. Поскольку поглощения в полосе на 915 нм и в полосе на 976 нм происходят с одного подуровня, то отношение их сечений сильно не меняется. Из-за увеличения температуры изменяется соотношение коэффициентов поглощения с подуровня *a* (полосы 915 и 976 нм) и с подуровня *b* (1034 нм), что сильно влияет на спектр усиленной спонтанной люминесценции и, следовательно, на свойства генерации, т. к. при изменении температуры растет перепоглощение излучения, что приводит к изменению спектра люминесценции световода.

При исследованиях температурной зависимости спектра люминесценции световодов, легированных ионами Yb^{3+} , использовались лазерные источники излучения с длинами волн 915 и 976 нм и объемные образцы толщиной 1–5 мм, вырезанные из заготовок активных световодов. Использование объемных образцов позволяет избежать усиления люминесценции, а также минимизировать искажение спектра из-за перепоглощения. Типичный спектр люминесценции объемного образца показан на рис.3. Уменьшение интенсивности люминесценции при увеличении температуры объясняется уменьшением поглощения на длине волны накачки. Слабое смещение

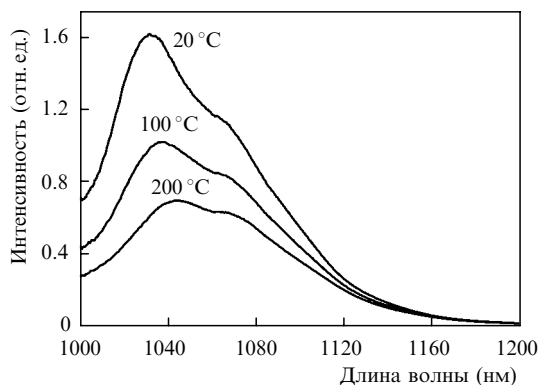


Рис.3. Спектры люминесценции заготовок, легированных ионами Yb³⁺, для различных температур.

максимума люминесценции может объясняться тем, что полностью исключить влияние перепоглощения не удастся.

4. Влияние нагрева на эффективность генерации волоконных лазеров

Возможны два механизма влияния нагрева на эффективность волоконных лазеров. Первый из них связан с изменением поглощения в полосе накачки. При этом можно ожидать уменьшения выходной мощности лазера из-за неполного поглощения излучения накачки. Однако источники, используемые для накачки волоконных излучателей, как правило, состоят из набора одиночных полупроводниковых лазеров со слегка отличающимися длинами волн. Как видно из рис.2, нагрев приводит к уширению полосы поглощения, поэтому следует ожидать более эффективного поглощения излучения лазеров с длинами волн излучения, смещенными относительно центра полосы поглощения. Последнее может компенсировать уменьшение эффективности использования излучения диодов с оптимальной длиной волны. Более того, если спектр источника накачки смещен как целое относительно максимума полосы поглощения, можно ожидать увеличения эффективности лазера при нагреве активного волоконного световода. Таким образом, проявление данного механизма определяется конкретными характеристиками используемого источника накачки.

Другой механизм связан с увеличением поглощения в полосе 1034 нм и соответственно в длинноволновом крае этой полосы. Следует ожидать, что для лазеров с длинами волн излучения вблизи центра этой полосы увеличение поглощения приведет к уменьшению выходной мощности волоконного лазера.

На рис.4 показаны спектры генерации лазера с различными комплектами брэгговских решеток, подобранными так, чтобы показать различные варианты генерации.

Спектр генерации лазера с брэгговскими решетками на длину волны 1064 нм показан на рис.4,а. При комнатной температуре лазер стабильно работает на такой длине волны. С увеличением температуры поглощение в указанном спектральном диапазоне растет, что приводит к уменьшению мощности генерации на этой длине волны. При дальнейшем нагреве лазер начинает генерировать на длине волны в диапазоне максимума усиленной спонтанной люминесценции, и поскольку резонатор в этом слу-

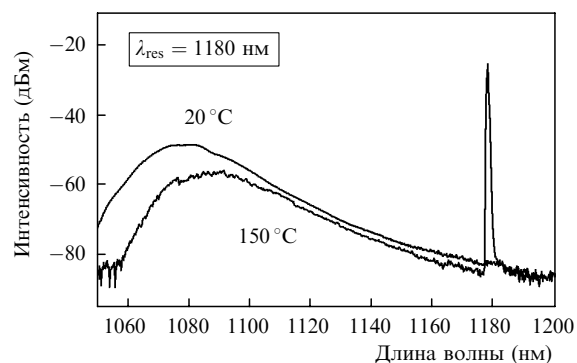
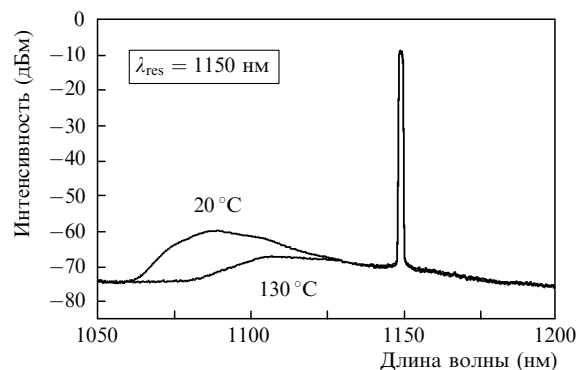
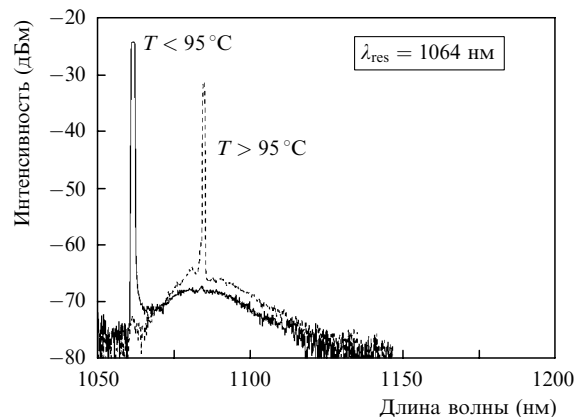


Рис.4. Спектры генерации лазеров с резонаторами, рассчитанными на различные длины волн излучения λ_{res}.

чае образуется за счет френелевского отражения от торцов, лазер работает в импульсном режиме.

На рис.4,б показан спектр генерации лазера с резонатором, образованном брэгговскими решетками на 1150 нм. Генерация на данной длине волны наблюдалась во всем исследованном диапазоне температур. Некоторое увеличение мощности на начальной стадии нагрева связано с уменьшением интенсивности усиленной спонтанной люминесценции в диапазоне 1000–1100 нм из-за возрастания поглощения в этой спектральной области.

На рис.4,в показан спектр излучения лазера с комплектом решеток на длину волны 1180 нм. В этом случае при комнатной температуре мощность люминесценции настолько меньше мощности в максимуме люминесценции, что генерация на длине волны 1180 нм не возникает, а при увеличении мощности накачки она возникает в области максимума люминесценции. При увеличении температуры растет перепоглощение люминесценции, из-за чего коротковолновая часть полосы люминесценции уменьшается настолько, что выполняются условия для возникновения генерации в длинноволновой области.

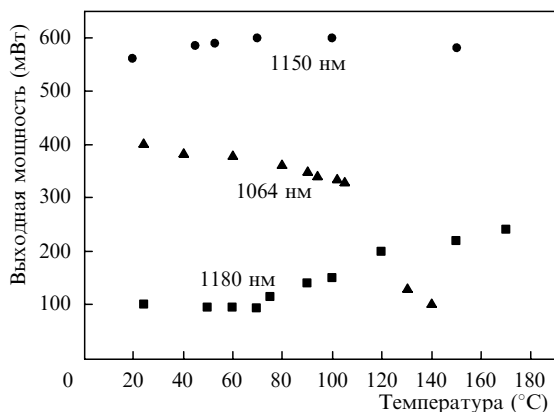


Рис. 5. Зависимости выходной мощности исследованных лазеров от температуры активной среды.

На рис. 5 показана зависимость выходной мощности лазеров от температуры. Уменьшение мощности генерации на длине волны 1064 нм с ростом температуры объясняется как уменьшением степени инверсии из-за падения поглощения излучения накачки, так и возрастанием перепоглощения сигнала; затем при определенной температуре генерация на этих брэгговских решетках срывается. Для лазера с длиной волны излучения 1150 нм наблюдается некоторое увеличение мощности на начальной стадии нагрева, связанное с уменьшением интенсивности усиленной спонтанной люминесценции в диапазоне 1000–1100 нм из-за возрастания поглощения в этой спектральной области. Падение мощности генерации при температурах выше 100 °C объясняется тем, что рост края полосы поглощения начинает сказываться и на указанной длине волны.

Влияние температуры на спектр люминесценции более всего проявляется на дальнем крае спектра – на длинах волн больше 1150 нм. При комнатной температуре в лазере с решетками на длину волны 1180 нм генерация не возникает из-за сильной конкуренции с усиленной спонтанной люминесценцией. С ростом температуры наблюдалось подавление усиленной спонтанной люминесцен-

ции, и при этом обеспечивались условия для генерации на 1180 нм. Лазерное излучение возникало при 70 °C, и эффективность лазера увеличивалась при дальнейшем росте температуры. При температуре 150 °C дифференциальная эффективность лазера достигала 30 %.

5. Заключение

Показано, что оптические свойства волоконных световодов, легированных ионами Yb^{3+} , зависят от температуры. Эту зависимость необходимо учитывать при создании волоконного лазера, который будет использоваться при высоких температурах или в условиях постоянного изменения температуры, т. к. выходные характеристики лазера при нагреве или охлаждении сильно изменяются. Кроме того, зависимость от температуры можно использовать для увеличения эффективности или для получения генерации в длинноволновой части спектра люминесценции иона Yb^{3+} , в которой лазер не работает при комнатной температуре. Для демонстрации температурных эффектов был создан волоконный лазер, легированный ионами Yb^{3+} , с брэгговскими решетками на длину волны 1180 нм. Эффективность генерации лазера составила примерно 30 % при температуре 150 °C.

1. Курков А.С., Карпов В.И., Лаптев А.Ю., Медведков О.И., Дианов Е.М., Гурьянов А.Н., Васильев С.А., Парамонов В.М., Протопопов В.Н., Умников А.А., Вечканов Н.И., Артюшенко В.Г., Фрам Ю. *Квантовая электроника*, **27**, 239 (1999).
2. Курков А.С., Парамонов В.М., Егорова О.Н., Медведков О.И., Дианов Е.М., Яшков М.В., Гурьянов А.Н., Залевский И.Д., Гончаров С.Е. *Квантовая электроника*, **31**, 801 (2001).
3. Dianov E.M., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Paramonov V.M., Egorova O.N., Kurukitkoson N., Turitsyn S.K. *Laser Phys.*, **13** (3), 1 (2003).
4. Pask H.M., Carman Robert J., Hanna David C., Tropper Anne C., Mackechnie Colin J., Barber Paul R., Dawes Judith M. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **1** (1), 2 (1995).
5. Kurkov A.S., Dianov E.M., Medvedkov O.I., Ivanov G.A., Aksenov V.A., Paramonov V.M., Vasiliev S.A., Pershina E.V. *Electron. Lett.*, **36**, 1015 (2000).