

# Столкновительный газоразрядный лазер на парах тулия

В.А.Герасимов, А.В.Павлинский

*Впервые на системе атомных уровней реализован столкновительный лазер по предложенному Гулдом принципу. Заселение верхнего и релаксация нижнего лазерных уровней происходят при неупругих столкновениях возбужденных атомов тулия с атомами гелия. Релаксация нижнего уровня осуществляется в реакции с дефектом энергии более  $13000 \text{ см}^{-1}$ .*

**Ключевые слова:** атом, столкновения, возбуждение, лазер.

Как известно, принцип действия столкновительного лазера был впервые предложен Гулдом в работе [1]. Согласно этому принципу возбуждение атомов происходит при столкновениях со свободными электронами, в то время как заселение верхнего и опустошение нижнего лазерных уровней осуществляются неупругими атомными столкновениями. Однако поиск активных сред с формированием инверсной населенности по указанному принципу к успеху не привел.

В связи с этим в работе [2] критерии Гулда было предложено видоизменить. В частности, это касалось способа заселения верхнего лазерного уровня. Так, по критериям Гулда его заселение не является прямым и осуществляется в результате атомных соударений второго рода. В работе [2] было предложено в качестве верхнего лазерного уровня использовать резонансные уровни, эффективно заселяемые в разряде прямым электронным ударом из основного состояния.

Таким образом, задача реализации столкновительного лазера свелась к переводу самоограниченного лазера в столкновительный режим за счет расселения метастабильного уровня в атом-атомных столкновениях с гелием. На этом пути был впервые осуществлен перевод в квазинепрерывный режим лазера на ионизированных парах европия [2].

Далее способы дезактивации нижнего лазерного уровня (метастабильного) были расширены. Так, в [3] для лазера на парах Са использовались процессы ионизации, столкновения с электронами и диффузии атомов в метастабильном состоянии на стенки лазерной трубки. В [4] переход в квазинепрерывный режим объяснялся дезактивацией метастабильного уровня в столкновениях с собственными атомами в основном состоянии.

В настоящей работе была предпринята попытка реализации столкновительного лазера на парах атомов металлов, основанного на критериях Гулда. В качестве исследуемого лазера использовался импульсный газо-

разрядный лазер на парах тулия, в качестве буферного газа – гелий.

Особенностью данного лазера является то, что из 17 лазерных переходов только один, с длиной волны  $\lambda = 589.9 \text{ нм}$ , является типично самоограниченным с резонансным уровнем в качестве верхнего лазерного. Для остальных лазерных переходов верхние уровни имеют ту же четность, что и основное состояние, и не могут эффективно заселяться электронным ударом из основного состояния [5]. В работе [5] было установлено, что наиболее вероятным механизмом заселения указанных верхних лазерных уровней является столкновительная передача возбуждения. При этом в ряде случаев заселение происходит при столкновениях атомов в возбужденных резонансных состояниях с собственными атомами в основном состоянии, а в некоторых случаях – с атомами гелия, что удовлетворяет критериям Гулда по каналу возбуждения верхних лазерных уровней. Основной задачей настоящей работы являлась попытка осуществления релаксации нижних лазерных уровней в атом-атомных столкновениях.

Используемая в исследованиях лазерная трубка из окиси алюминия имела внешний подогрев. Внутренний диаметр газоразрядного канала составлял 20 мм, длина канала – 400 мм. Цилиндрические электроды из ниобия находились в торцах газоразрядного канала, а кусочки металлического тулия (содержание основного вещества 99.85 %) размещались по всей длине канала. Исследование проводилось при фиксированной температуре газоразрядного канала  $1100^\circ\text{C}$ , что соответствовало концентрации атомов тулия  $n_{\text{Tm}} = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Возбуждение активной среды проводилось прямым разрядом емкости 1.5 нФ, заряженной до напряжения 12 кВ, через водородный тиратрон ТГИ1-1000/25 при частоте повторения импульсов 7 кГц. Контроль температуры осуществлялся оптическим пирометром. Осциллограммы импульсов тока и генерации фиксировались осциллографом С7-17. Импульсы тока снимались поясом Роговского. Лазерное излучение селективировалось монохроматором МДР-23 и подавалось на фотоумножитель ФЭУ-62, способный регистрировать импульсы генерации с длиной волны до 2 мкм [6]. Оптический резонатор состоял из двух плоских зеркал: одного плотного с алюминиевым покрытием,

В.А.Герасимов, А.В.Павлинский. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 1

Поступила в редакцию 18 декабря 2002 г., после доработки – 19 июня 2003 г.

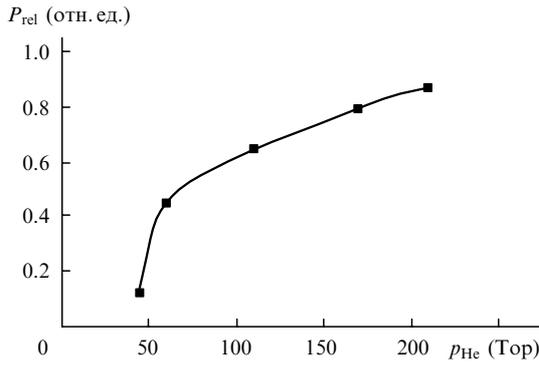


Рис.1. Зависимость относительной мощности лазерного излучения  $P_{rel}$  ( $\lambda = 1069$  нм) от давления гелия  $p_{He}$ .

другого полупрозрачного с коэффициентом отражения 50 % в области  $\lambda = 1000 - 1500$  нм.

Особенностью поведения спектра лазерного излучения в лазере на парах тулия при изменении давления буферного газа (He) является то, что с увеличением давления до 30 Тор остается только линия генерации с  $\lambda = 1310$  нм. При увеличении давления гелия до 40 Тор генерация в наших условиях возбуждения прекращается на всех лазерных переходах, что является следствием уменьшения электронной температуры.

Дальнейшее повышение давления гелия привело к появлению генерации на единственном переходе с  $\lambda = 1069$  нм. На рис.1 приведена зависимость мощности генерации на этом переходе от давления гелия  $p_{He}$ , а на рис.2 – соответствующее изменение осциллограмм импульса генерации. Максимальная мощность лазерного излучения составила 550 мВт при КПД около 0.1 %. Поскольку оптимизация условий возбуждения в настоящей работе не проводилась, то по указанным цифрам нельзя судить о перспективах данного лазера. Из рис.1 видно, что рост удельного энергосъема происходит как минимум до  $p_{He} = 210$  Тор. Похожая ситуация наблюдалась в работах [2, 7], но для лазерных переходов в системе уровней первых ионов Eu и Yb.

На рис.3 приведена диаграмма Гротриана для интересующих нас переходов. Здесь канал накачки образуют два резонансных уровня, принадлежащих конфигурации  $4f^{12}5d6s^2$  с энергиями  $E_1 = 22791$  см<sup>-1</sup> и  $E_2 = 22929$  см<sup>-1</sup>. Вблизи них расположена группа верхних лазерных уров-

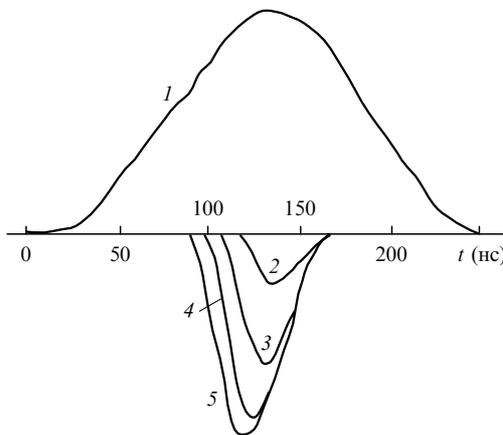


Рис.2. Импульс тока (1) и динамика формы импульса генерации на  $\lambda = 1069$  нм при  $p_{He} = 60$  (2), 110 (3), 170 (4) и 210 Тор (5).

$4f^{13}6s^2$	$4f^{12}5d6s^2$			$4f^{12}6s^26p$	$4f^{13}5d6s$
$2F_0$	$^3F_4$	$^3H_5$	$^3H_6$	$^3H_6$	$^2F_{7/2}^0(^3D)$
	$(4, ^5/2)$	$(5, ^3/2)$	$(6, ^3/2)$	$(6, ^1/2)^0$	$^3[5, ^1/2]^0$

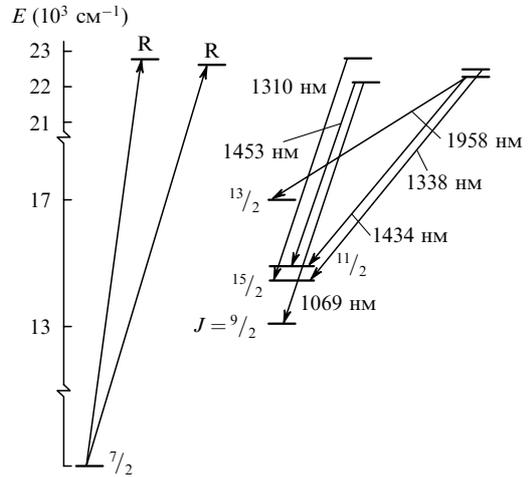


Рис.3. Диаграмма Гротриана для наиболее низколежащих переходов в лазере на парах тулия. Стрелки, направленные вниз, обозначают лазерные переходы; R – резонансные уровни, J – угловые моменты.

ней с энергией  $E = 22468$  и  $22902$  см<sup>-1</sup> ( $4f^{12}6s^26p$ ), а также с  $E = 22559$  и  $22742$  см<sup>-1</sup> ( $4f^{13}5d6s$ ), имеющих ту же четность, что и основное состояние. С этих уровней начинаются шесть лазерных переходов с  $\lambda = 1958.44$ ,  $1453.04$ ,  $1433.97$ ,  $1338.01$ ,  $1310.06$  и  $1069.39$  нм. В [5] было показано, что их заселение происходит посредством передачи возбуждения с указанных резонансных уровней при столкновениях атомов тулия и гелия. При этом лазерный переход с  $\lambda = 1069$  нм при давлении гелия менее 30 Тор является самым слабым, а инверсия населенности на нем формируется последней по времени после всех лазерных переходов в атоме тулия. Причиной этого является то, что, во-первых, верхний лазерный уровень данного перехода отстоит дальше всех от резонансных уровней, а во-вторых, с этого же уровня начинается более сильный конкурирующий переход с  $\lambda = 1453.04$  нм. В этом случае генерация на переходе с  $\lambda = 1069$  нм начинается только после окончания импульса генерации с  $\lambda = 1453.04$  нм.

Отсюда следует, что появление генерации на переходе с  $\lambda = 1069$  нм при большом давлении гелия (в отсутствие генерации на остальных переходах) никак не связано с верхними лазерными уровнями. Что касается нижних лазерных уровней, то для этого перехода нижний уровень является самым низколежащим, причем переход с него в основное состояние разрешен. На наш взгляд, инверсия населенности на лазерном переходе с  $\lambda = 1069$  нм появляется в результате тушения уровня с  $E = 13119$  см<sup>-1</sup> в столкновениях атомов Tm и He.

Как известно, столкновительные процессы (например, передача возбуждения) эффективны при условии, что  $\Delta E < kT_g$ , где  $\Delta E$  – дефект энергии,  $T_g$  – газовая температура. В наших же условиях  $\Delta E = 13119$  см<sup>-1</sup>, что много больше  $kT_g$  ( $\Delta E \sim 13kT_g$ ). Похожая ситуация на-

блюдается в ионном гелий-европиевом лазере. В работе [8] было показано, что функционирование He–Eu<sup>+</sup>-лазера обеспечивается благодаря эффективной релаксации метастабильных состояний <sup>7</sup>D<sup>0</sup> в столкновениях с атомами гелия при  $\Delta E > 9kT_g$ .

Сечение указанного процесса было измерено в [9]. Несмотря на высокий дефект энергии ( $\Delta E > 5600 \text{ см}^{-1}$ ), сечение оказалось неожиданно большим – порядка  $10^{-16} \text{ см}^2$ . В нашем случае эффективная релаксация уровня в основное состояние идет при заметно большем  $\Delta E$ . Использование в качестве буферного газа неона при прочих равных условиях к появлению лазерного излучения не приводило. Оценка концентрации электронов по проводимости плазмы при увеличении давления гелия показала ее практическую неизменность. Это позволяет утверждать, что расселение нижнего лазерного перехода с  $\lambda = 1069 \text{ нм}$  обусловлено процессами столкновений атомов тулия с атомами гелия.

Использование критерия «столкновительности» лазера, основанного на соотношении времени спонтанного распада верхнего лазерного уровня на лазерном переходе и длительности генерации, невозможно по двум причинам.

Во-первых, данный верхний лазерный уровень имеет одинаковую четность с основным. Для таких атомных

уровней в лантаноидах измерений времени жизни, насколько нам известно, не проводилось. Во-вторых, работа лазеров на парах редкоземельных элементов эффективна только при пленении излучения на резонансных переходах, чьи верхние уровни лежат вблизи верхних лазерных уровней и являются донорами. А в этом случае эффективное время жизни резонансного уровня при рабочих концентрациях атомов в сотни раз больше, чем при спонтанном распаде в отсутствие пленения. При этом верхний лазерный уровень будет заселяться такое же время.

Тем не менее авторы имеют основания утверждать, что главный критерий Гулда выполняется.

1. Gould G. *Appl. Opt. Suppl.*, **2**, 59 (1965).
2. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е. *Квантовая электроника*, **1**, 1365 (1974).
3. Батенин В.М., Калинин С.В., Климовский И.И. *Квантовая электроника*, **9**, 2075 (1982).
4. Бохан П.А. *Квантовая электроника*, **13**, 1595 (1986).
5. Герасимов В.А., Юнжаков Б.П. *Квантовая электроника*, **16**, 2386 (1989).
6. Клишкин В.М., Прокопьев В.Е. *Приборы и техника эксперимента*, № 5, 215 (1976).
7. Клишкин В.М. *Квантовая электроника*, **2**, 579 (1975).
8. Бохан П.А., Фадин А.В. *Оптика и спектроскопия*, **52**, 626 (1982).
9. Бохан П.А. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 335 (1985).