

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА РАБОТУ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ ГАЛОГЕНИДОВ МЕТАЛЛОВ

Г.Г.Петраш

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

119991, Москва, Ленинский проспект 53. gpetrafh@sci.lebedev.ru

Импульсные лазеры на переходах с резонансных на метастабильные уровни (лазеры на R-M переходах или R-M лазеры) составляют один из важных классов газовых лазеров [1-3]. Наиболее известные из них - лазеры на R-M переходах атома меди. Эти лазеры генерируют на двух линиях $\lambda = 510.5$ нм и 578.2 нм. Они обладают в настоящее время наибольшей эффективностью генерации (для лучших превышающей 3%) среди лазеров, генерирующих в видимой области спектра, а также высокой средней (до сотен Вт) и пиковой мощностью, большой частотой повторения импульсов (от кГц до 300 кГц) и очень большим усилением. В связи с этим они давно стали предметом многочисленных исследований и разработок и нашли применения во многих областях: для накачки перестраиваемых лазеров, для разделения изотопов, для зондирования атмосферы, для обработки различных материалов, в системах с усилителями яркости и даже в шоу-бизнесе.

В начале их развития был создан лазер на парах меди (ЛПМ), в котором импульсный разряд с высокой частотой повторения возбуждался в керамических трубках, нагреваемых, обычно в режиме саморазогрева, до температуры стенки 1400-1600°C, в смеси неона и паров меди. Высокая температура нужна для того, чтобы за счет термического испарения обеспечить необходимую плотность атомов меди порядка $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Впервые промышленный выпуск лазеров на парах меди был налажен в России. В настоящее время на предприятии "Исток" г. Фрязино, выпускаются отпаянные разрядные трубки ЛПМ с мощностью генерации от единиц до 70 Вт и с эффективностью около 1%. В других странах налажено производство только разрядных трубок ЛПМ, работающих с протоком буферного газа. Промышленные ЛПМ широко используются, прежде всего в системах лазерного разделения изотопов.

Однако высокая температура разрядных трубок приводила к ряду трудностей, т.к. требуется использовать высокотемпературные материалы, применять эффективную теплоизоляцию разрядной трубки, сложную процедуру обезгаживания и т.п. Кроме того, велико время выхода таких лазеров на рабочий режим.

В связи с этим были предприняты попытки использовать в качестве рабочего вещества не сами металлы, а их соединения с более низкой температурой испарения. Было испробовано большое число соединений меди и других металлов, и на многих из них получена генерация при значительно более низкой температуре стенки трубки. Так, для меди удалось получить генерацию при понижении температуры вплоть до 40°C. Однако большая часть этих соединений оказалась мало удобной для практики, т.к. после диссоциации в разряде они не рекомбинировали в исходное соединение, что приводило к необходимости работать с быстрым протоком газа и большому расходу рабочего вещества.

Наиболее практичными оказались галогениды металлов, в частности галогениды меди. В этом случае рекомбинация приводит к исходным соединениям, что позволило работать без протока газа и даже разработать отпаянные разрядные трубки с достаточно большим сроком службы.

Необходимая плотность галогенидов меди достигается при температуре 450-550°C, что примерно на 1000°C ниже, чем для лазера на парах меди. Это сильно упрощает и удешевляет конструкцию разрядных трубок для лазеров на галогенидах меди. В большинстве случаев разрядные трубки изготавливаются из плавленого кварца. Рабочее вещество обычно помещается в специальные отростки, нагреваемые до необходимой

температуры небольшими печами. Активная зона трубки окружается наружной теплоизоляцией так, чтобы в рабочем режиме ее температура несколько превышала температуру отростков. При этом рабочее вещество не конденсируется в активной зоне, а медленно диффундирует через буферный газ в холодные концевые части трубки, где и конденсируется. Торцы трубки закрываются оптическими окнами для вывода лазерного излучения.

В лазерах с такими разрядными трубками были получены характеристики генерации, вполне сравнимые с характеристиками обычных ЛПМ. Наряду с простотой и дешевизной разрядных трубок лазеры на галогенидах меди обладают и другими преимуществами. В саморазогревном варианте в них можно независимо регулировать плотность рабочего вещества и мощность накачки, что облегчает оптимизацию лазера. С ЛПМ это сделать не удастся. Кроме того, время выхода на режим у лазеров на галогенидах значительно короче, что важно для некоторых применений.

Существенное улучшение характеристик лазеров на галогенидах меди было достигнуто при добавках в их активную среду водорода [4]. Оказалось, что добавка всего 0.3 Торра водорода в лазер на бромиде меди приводит к двукратному увеличению мощности генерации и, что особенно важно, к такому же росту эффективности. Дальнейшее развитие этого типа лазеров привело к увеличению эффективности до 3% при средней мощности генерации 100 Вт. Оказалась также, что с лазером на бромиде меди можно достичь заметно большей частоты повторения импульсов. В последнее время при частоте повторения 100 кГц достигнута средняя мощность генерации 10 Вт [5]. С ЛПМ при такой частоте повторения значительных мощностей получить не удавалось. Причины увеличения мощности и эффективности мы рассмотрим несколько позже.

Следующим шагом в развитии R-M лазеров на переходах меди стала разработка так называемого “гибридного” лазера (Cu HуBrID laser). В этом лазере в разрядную трубку с надлежащей теплоизоляцией помещают на стенку кусочки меди. Разряд вначале возбуждается в потоке неона, с помощью чего температура стенки трубки повышается примерно до 600 °С. Затем в поток неона подмешивается HBr. Реакция меди с HBr приводит к образованию бромида меди, который испаряется со стенки трубки и поступает в разряд. Как и в лазере на бромиде меди, диссоциация бромида освобождает атомарную медь, на переходах которой и происходит генерация.

Сравнительные исследования гибридного лазера и лазера на бромиде меди с водородом показали [6], что для сравнимых разрядных трубок в оптимальных для генерации условиях характеристики этих лазеров весьма близки, что должно свидетельствовать о близком составе активной среды. В газовой фазе бромид меди существует преимущественно в виде молекул Cu_3Br_3 . При работе в регулярных импульсах в результате ряда плазмохимических реакций с течением времени устанавливается определенный состав среды. В частности, молекулы бромида диссоциируют в разряде, освобождая атомы меди. В целом по имеющимся данным активная среда состоит из буферного газа неона, молекул Cu_3Br_3 и продуктов их распада, а также Cu, H_2 и H, HBr, Br, возможно присутствие и других компонентов, например CuH. Состав зависит от концентраций исходных компонентов и от режима возбуждения разряда. Точный состав среды для этих лазеров пока установить не удалось, что сильно затрудняет анализ процессов в этих лазерах.

В особенности важно знать концентрацию молекул HBr, т.к. установлено [1,7], что их присутствие резко меняет кинетику разряда и распада плазмы в межимпульсные периоды. Собственно наличие HBr и приводит к улучшению характеристик генерации по сравнению с ЛПМ. Молекула HBr обладает большим сечением диссоциативного прилипания с максимумом при ~ 0.4 эВ. В начале импульса возбуждения разряд не развивается до тех пор, пока температура электронов T_e не превысит определенного значения, зависящего от концентрации HBr, т.к. при низких T_e скорость прилипания электронов превышает скорость ионизации. Таким образом, можно избежать низких

значений T_e , что важно для работы лазера, т.к. при $T_e < 1.7$ эВ в основном возбуждается нижний, а не верхний лазерный уровень. Присутствие НВг также резко меняет характер рекомбинации плазмы - вместо медленной трехчастичной рекомбинации происходит сначала прилипание электронов, а затем значительно более быстрая ион-ионная рекомбинация. Это тоже улучшает условия работы лазера, особенно при недостаточно крутом фронте нарастания напряжения на разрядной трубке.

В последнее время значительное число работ было посвящено также еще одному типу лазеров на R-M переходах меди. Это так называемые "лазеры с улучшенной кинетикой" (kinetically enhanced lasers). В этом случае в активную среду обычного лазера на парах меди добавляется НВг или HCl. Эти лазеры работают с протоком газа и также демонстрируют характеристики генерации лучше, чем у ЛПМ. По сравнению с рассмотренными выше лазерами на галогенидах с добавками водорода и гибридными лазерами, в этом случае значительно выше температура стенки и газа. Видимо повышение температуры приводит к тому, что при этом и с HCl достигается сравнимое улучшение генерации. Сечение прилипания электронов для HCl намного меньше, чем для НВг, однако оно быстро растет с ростом температуры.

Наконец, следует отметить, что сказанным не исчерпывается интерес к плазмохимическим процессам в газовых лазерах. Они играют существенную роль и для других типов лазеров. Ограничения объема заставляют ограничиться рассмотрением упомянутых выше лазеров, где эти проблемы по-видимому особенно актуальны.

Представляло бы большой интерес использовать опыт работ по плазмохимии для установления наиболее вероятных реакций в активной среде рассматриваемых лазеров и на этой основе определить или хотя бы оценить состав их активных сред и его зависимость от начального состава и условий импульсного разряда.

Автор благодарен Российскому фонду фундаментальных исследований (грант 01-02 17404) за поддержку работ по исследованию лазерам на парах металлов и их соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Little C.E.// *Metal Vapour Lasers*, John Wiley & Sons, Chichester, New York, Weinheim, Singapore, Toronto, 1999.
2. *Pulsed Metal Vapour Lasers*, C.E.Little, N.V.Sabotinov, Eds, pp. 43-54, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
3. Батенин В.М., Бучанов.В.В., и др.// *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов*, РФФИ, М. 1998.
4. Astadjov D.N., Sabotinov N.V., Vuchkov N/K. // *Optics Communications*, 1985, v. 56, p. 279-282.
5. Евтушенко Г.С.// *частное сообщение*.
6. Isaev A.A, Jones D.R., Little C.E., Petrash G.G., Whyte C.G., Zemskov K.I.// *IEEE J. Quantum Electronics*, 1997, v. 33, pp. 919-926.
7. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г.// *Квантовая электроника*, 1997, т. 24, с. 596-600.