

Г.С. Евтушенко, А.Г. Филонов

## ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

Изучено распределение температуры вдоль активной зоны «саморазогревного» лазера на парах металлов. Показано, что существенный вклад в формирование температурного поля вносят приэлектродные области. На примере Cu- и Rb-лазеров показано, что выбором конструкции разрядной трубки и экспериментальных условий возможно создание «температурных пробок», затрудняющих вынос паров металла из активной зоны.

При изучении работы лазеров на парах металлов весьма важным является его температурный режим. Нами рассматривалась газоразрядная трубка, работающая в режиме саморазогрева [1]. Температурное поле в такой конструкции формируется за счет диссипации энергии разряда. Разряд в газе характеризуется приэлектродным падением потенциала, положительным столбом, т.е. температурное поле уже неоднородно по способу создания. Кроме того, поддержание рабочей температуры осуществляется с помощью теплоизолятора, которому присущи градиенты температур, определяемые как краевыми эффектами, так и конструкцией самого теплоизолятора. Рассматривая температурный режим работы лазера на парах металлов, важно определить параметры системы, отвечающие за распределение температуры в рабочем объеме, а также масштабы и условия их влияния с целью эффективного регулирования процесса формирования температурного поля. Важность такой работы представляется актуальной не только с точки зрения увеличения эффективности работы лазера, но и с точки зрения увеличения срока службы как активного элемента, так и прибора в целом.

### Экспериментальная установка

Для определения температурного поля вдоль разрядного канала нами была изготовлена экспериментальная газоразрядная трубка (рис. 1, а), вдоль рабочего канала которой расположены термопары 1. Для увеличения срока службы газоразрядной трубки и уменьшения влияния разряда на термопары была применена конструкция, в которой рабочее вещество 2 располагалось во вкладыше 3. Вкладыш вставлялся в несущую трубку 4, которую окружал теплоизолятор 5. В такой конструкции температура, измеряемая термопарами, расположенными вдоль несущей трубки, значительно ниже температуры, реализуемой в рабочем объеме, и сильно сглажена. Вместе с тем качественная картина распределения температуры вдоль газоразрядного канала сохраняется. На измерения также влияет некоторая локальная неоднородность теплоизолятора в местах расположения термопар, но это влияние незначительно. Внутренний диаметр вкладыша составлял 30 мм, длина вкладыша 500 мм. Расстояние между термопарами равнялось 110 мм с отступлением от краев 30 мм. Применялись платина-платинородиевые термопары, позволяющие измерять температуру во всем рабочем диапазоне. Теплоизолятором являлся порошок  $ZrO_2$ . Вакуумная рубашка 6 изготавливалась из плавленого кварца. По краям вкладыша располагались электроды 7 из ниобия. Медь общим весом 2 г распределялась кусочками вдоль разрядного канала. Выходные окна 8 – плоскопараллельные пластинки из обычного стекла.

Электрическая схема (рис. 1, б) типична для саморазогревных лазеров на парах металлов [1]. Источник питания работал в режиме:  $U = 3$  кВ,  $I = 200$  мА,  $f = 10$  кГц. Мощность генерации измерялась калориметрическим измерителем мощности ИМО-2. Плоскопараллельный резонатор состоял из глухого зеркала с диэлектрическим покрытием и выходной стеклянной пластины с коэффициентом отражения 15%. Показания термопар снимались прибором ПП-63, что позволяло измерять температуру с точностью 10%. Для сравнения результатов были проведены эксперименты с газоразрядной трубкой лазера на парах свинца.

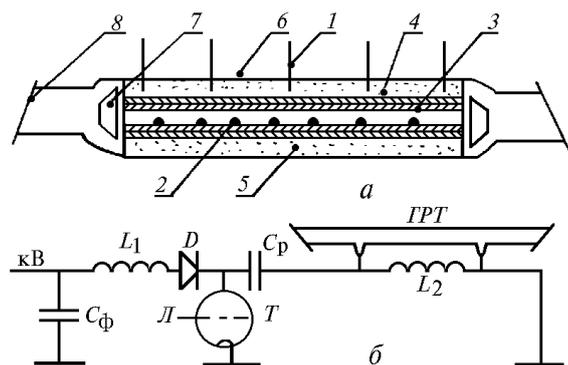


Рис. 1. Экспериментальная установка: *a* – газоразрядная трубка (1 – термопары, 2 – рабочее вещество, 3 – вкладыш, 4 – несущая трубка, 5 – теплоизолятор, 6 – вакуумная трубка, 7 – электроды, 8 – окна); *б* – электрическая схема (ГРТ – газоразрядная трубка; Т – тиратрон ТГИ1-1000/25;  $L_1$  – зарядная индуктивность;  $C_\Phi$  – емкостной фильтр (680 пФ);  $L_2$  – шунтирующая индуктивность; Д – диоды)

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измерение температурного профиля проводилось при различных давлениях (3, 7, 10, 20, 30, 50, 100, 150 мм рт.ст) буферного газа – неона. Прежде всего нас интересовала разница в показаниях термопар и температуры, реализуемой внутри газоразрядного канала. Как уже отмечено, использование вкладыша сильно увеличивает разрыв в показаниях. В предыдущих экспериментах в некоторых случаях происходило локальное разрушение керамики под действием высокой температуры, а в нашем случае это приведет к разрушению термопары и трубки в целом. Совместное измерение температуры внутри канала с помощью пирометра «Проминь» и термопар показало, что разница составляла 600°C. Пирометр настраивался на керамику. Разница была существенной, но нас интересовала качественная картина температурного поля вдоль разрядного канала.

Распределение температуры вдоль разрядного канала показано на рис. 2, *a*. Оно не только неоднородно по длине, но и существенно меняется с изменением давления буферного газа. При этом можно говорить о трех областях, в которых поведение температуры имеет особенности: прикатодная область, центральная и прианодная. В центральной области температура с увеличением давления растет при малых давлениях. Начиная с давления 20 мм рт.ст и выше измерения температуры уже не наблюдались. Существенным падением температуры должны характеризоваться прикатодная и прианодная области из-за краевых потерь. Тем не менее мы видим, что прикатодная область характеризуется достаточно высокой температурой, которая во всех случаях выше температуры прианодной области. Из этого можно сделать вывод, что в прикатодной области выделяется значительная доля энергии, определяемая катодным падением потенциала. Более того, при малых давлениях буферного газа реализуются условия, в которых температура в прикатодной области выше, чем в центре газоразрядной трубки. Конструкция газоразрядной трубки была симметрична относительно центральной области. Поэтому замена анода катодом должна была сохранить выявленное отличие прикатодной области. Результат замены анода катодом представлен на рис. 2, *б*, из которого видно, что температура прикатодной области превышает температуру центральной и прианодной областей. Следовательно, приэлектродные области играют существенную роль в формировании температурного поля. На рис. 2, *в* показано распределение температурного поля вдоль разрядного канала по мере разогрева с интервалом 10 мин. Обращает на себя внимание тот факт, что в первые минуты работы опережающими темпами идет прогрев прикатодной области. Градиенты небольшие, потери, связанные с этим, в какой-то степени одинаковы по длине, и на этом фоне распределение температуры показывает относительную разницу в выделении энергии по областям газоразрядного канала. При уменьшении давления этот эффект усиливается, при увеличении – становится меньше. Проведенные измерения температурного поля лазера на парах свинца при малых давлениях буферного газа показали, что в этом случае осуществляется режим более высокой температуры как катода, так и анода (рис. 3).

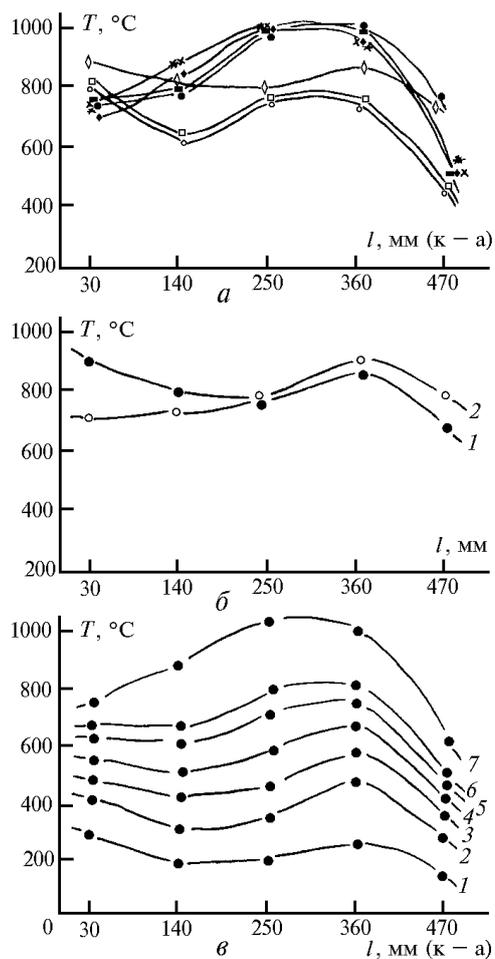


Рис. 2. Распределение температуры вдоль разрядного канала.  $\circ$  – 3;  $\square$  – 7;  $\diamond$  – 10;  $\bullet$  – 20;  $\blacksquare$  – 30;  $\blacklozenge$  – 50;  $\times$  – 100;  $*$  – 150 мм рт. ст. Буферный газ – неон (а). Изменение температурного профиля при замене местами анода (а) и катода (к). 1 – к-а; 2 – а-к (б). Вид температурного поля по мере разогрева: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – замеры через 10 мин; 7 – через 40 мин. Давление газа – 50 мм рт.ст.

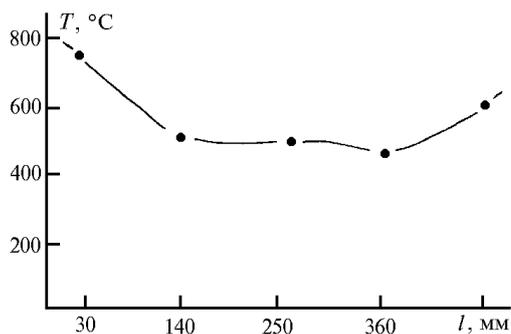


Рис. 3. Температурное поле в лазере на парах свинца при давлении 4 мм рт.ст. Не

Такое краевое повышение температуры можно использовать для создания так называемых «температурных» пробок, затрудняющих вынос активного вещества из рабочего объема и увеличивающих срок службы газоразрядной трубки, работающей в отпаянном режиме. Что касается лазера на парах меди, то возможны конструктивные решения для усиления эффекта, а также с помощью электрической схемы возможна поочередная замена анода катодом, что создает идентичные «температурные» пробки по краям газоразрядной трубки. Более высокую температуру в прикатодной области можно использовать при работе с разными средами в одном объеме. Примером может служить лазер на парах золота и меди. При расположении зо-

лота со стороны катода генерация на золоте происходит более эффективно. При этом надо учитывать и повышенное напряжение вблизи катода, что также способствует генерации. По крайней мере, при разработке конструкций газоразрядных трубок надо учитывать этот эффект. При увеличении давления температура прикатодной области снижается, что может быть связано с уменьшением области катодного падения потенциала, а также с увеличением теплопроводности газа. Результаты работы согласуются с результатами работы [2].

Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением давления буферного газа возрастает доля энергии, выделяющаяся в центральной области канала. Это приводит к понижению температуры в прикатодной области и росту температуры в центре. В наших условиях замена определяющего фактора в формировании температурного поля происходит при изменении давления буферного газа от 10 до 50 мм рт.ст. При этом надо отметить существенную роль увеличения теплопроводности газа и, соответственно, увеличение суммарной теплопроводности газа и теплоизолятора. Это выражается на кривых распределения температуры в том, что они становятся более плавными. Увеличение теплопроводности газа в какой-то мере сдерживает рост температуры в центральной части и расширяет область высокой температуры по длине, образуя область с равномерной температурой.

На рис. 4 показан график поведения мощности генерации в зависимости от давления буферного газа. При этом выдерживалась постоянная мощность, потребляемая системой. При малом давлении идет быстрый рост мощности генерации, а затем она устанавливается на определенном уровне с последующим медленным спадом. Из приведенных графиков распределения температуры видно, что при малых давлениях значительная часть энергии выделяется в приэлектродных областях, характеризующихся высокими потерями. Соответственно, средняя температура по рабочему каналу занижена, и работа осуществляется на пороге генерации. В этих условиях малое увеличение температуры и энергии, выделяемой в центральной части, приводит к значительному росту мощности генерации. При достижении некоторых оптимальных условий по давлению в процессе его повышения, расширение области с высокой температурой становится незначительным, при этом прекращается рост температуры в центральной части, т.е. формируется некоторый стабильный режим. Надо также учитывать, что на эту картину накладываются и другие факторы, которые существенно влияют на мощность генерации. Так, при увеличении давления происходит перераспределение мощности, выделяемой в системе коммутатор – газоразрядная трубка, изменяется крутизна переднего фронта импульса возбуждения [3]. Как результат при дальнейшем увеличении давления идет медленный спад мощности генерации.

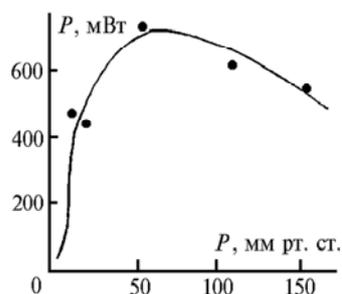


Рис. 4. Зависимость мощности генерации от давления Ne при постоянной вкачиваемой мощности (600 Вт)

Локальные перегревы отрицательно влияют на срок службы газоразрядной трубки. В нашем случае сильные перепады температур возникают в прикатодной области в процессе выхода на рабочий режим. При выходе на рабочий режим в два этапа, а именно: предварительный прогрев в течение 10 мин с подаваемой на газоразрядную трубку половиной от потребляемой мощности, а затем подача полной мощности – возникающие градиенты уменьшались в 2 раза. Время выхода лазера на рабочий режим при этом увеличивалось не более чем на 5 мин.

В заключение можно сказать, что температурный режим саморазогревного лазера представляет собой неоднородную картину как во время его установления, так и в режиме работы. Учитывая выявленные в процессе эксперимента особенности, можно разрабатывать лазеры, работающие с большой эффективностью и надежностью.

1. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью генерации // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16. С. 40.
2. Евтушенко Г.С., Кириллов А.Е., Полунин Ю.П., Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Исследование лазера на парах меди и золота с пространственно разнесенными активными средами // Журнал прикладной спектроскопии. 1983. Т. 39. № 6. С. 939–944.
3. Исаев А.А., Леммерман Г.Ю. Система питания импульсных лазеров на парах металлов // Труды ФИАН. 1987. Т. 181. С. 164–179.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
20 октября 1996 г.

G.S. Evtushenko, A.G. Filonov. **Temperature Regime of Metal Vapor Laser Operation.**

The temperature distribution along active zone of «self-heating» metal vapor laser is treated in the paper. A significant contribution of the near-electrode area into the temperature field formation is shown. It is demonstrated by the example of Cu- and Pb-lasers that due to the proper choice of the discharge tube construction and the experimental conditions, «the temperature locks» are possible to be created, which hinder the metal vapor removal from the laser active zone.