

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.375.826

В. Г. ГОЛЬДОРТ, С. И. КОЖЕМЯЧЕНКО, Ю. Я. ПЕЧЕРСКИЙ,
В. Л. РЕВУЦКИЙ, М. Н. СКВОРЦОВ
(Новосибирск)

ИОННЫЙ АРГОНОВЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Введение. Ионные аргоновые лазеры являются мощным источником непрерывного когерентного излучения в видимом и УФ-диапазонах. Они находят применение в различных областях: научных исследованиях, метрологии, промышленности, медицине — и постоянно привлекают к себе внимание как потребителей, так и разработчиков.

С момента, когда впервые была получена непрерывная генерация на ионах аргона в кварцевой разрядной трубке [1], усилия экспериментаторов были направлены на увеличение мощности генерации, для чего требовалось повысить плотность тока в разрядном канале, которую кварцевый капилляр уже не выдерживал. Вскоре появились сообщения о лазерах с разрядным каналом на основе элементов из металла [2, 3], графита [4, 5], керамики [6]. В дальнейшем было опубликовано большое количество работ, в которых описаны различные варианты ионных аргоновых лазеров непрерывного действия, являющиеся в основном развитием этих конструкций. При этом достигнутые уровни выходной мощности составили порядка ста ватт и выше с лазерами, имевшими разрядный канал, состоящий из графитовых шайб [7], металлических секций [8], металлокерамических элементов [9]. Наибольший уровень мощности (500 Вт) достигнут с лазером на металлических шайбах из алюминия [10]. Все эти результаты относятся к лазерам с постоянной прокачкой рабочего газа.

Однако наибольший практический интерес представляют отпаянные лазеры. Наиболее мощные коммерческие лазеры обеспечивают выходную мощность на уровне ~20 Вт.

От лазеров, находящих применение в научных исследованиях, часто требуется наличие таких качеств, как достаточно высокая выходная мощность (~10 Вт и выше), возможность работы на различных длинах волн, высокие монохроматичность и стабильность выходной мощности и частоты.

В данной работе описан ионный аргоновый лазер, при разработке которого авторы стремились создать прибор, который в возможно большей степени отвечал бы потребностям исследователя и допускал дальнейшее расширение своих возможностей.

Построение прибора. Конструктивно прибор состоит из двух основных блоков — собственно лазера, или излучателя, включающего активный элемент, оптический резонатор, вспомогательные блоки и цепи, и блока управления, в котором содержатся: силовой источник питания, дополнительные блоки управления работой лазера, органы управления и приборы контроля. Излучатель и блок управления соединены между собой двумя электрическими кабелями.

Схематический чертеж излучателя представлен на рис. 1. Основой излучателя является силовой, несущий элемент — арматура. Она состоит

из четырех инваровых стержней диаметром 40 мм и длиной 2 м и пяти фланцев, распределенных по ее длине. На крайних фланцах расположены юстировочные узлы для оптических элементов, образующих резонатор лазера. Между двумя внутренними фланцами закреплен электромагнит, создающий продольное магнитное поле ($\sim 0,8$ кГс), а вовнутрь электромагнита вставляется активный элемент. Эти фланцы имеют юстировочные узлы, позволяющие изменять положение электромагнита вместе с активным элементом, что бывает необходимо при оптической юстировке лазера. Эти же фланцы являются для лазера и опорными. На отдельном фланце есть дополнительный юстировочный узел, предназначенный для установки какого-либо внутрирезонаторного оптического элемента, например, эталона Фабри — Перо, оптического модулятора и т. д.

Наиболее сложной частью излучателя является активный элемент. В целом он имеет металлокерамическую конструкцию, и лишь некоторые его части выполнены из стекла. Разрядный канал активного элемента изготовлен из керамики BeO и составлен из двух секций общей длиной 940 мм и внутренним диаметром 3 мм. Такие размеры разрядного канала позволяют обеспечить работу лазера от источника питания с непосредственным выпрямлением переменного напряжения силовой сети 380 В при полном использовании напряжения и отказаться от громоздкого силового трансформатора, используемого в некоторых приборах. Керамические секции соединены между собой и с другими частями активного элемента через переходные титановые втулки с помощью твердой пайки [11]. К одному концу разрядного канала твердой пайкой присоединен трубчатый анод, а к другому — тонкостенная колба из нержавеющей стали, внутри которой размещен оксидный катод. Он обеспечивает ток разряда более 50 А. На анодном и катодном концах имеется по одному переходу ковар — стекло, каждый из которых оканчивается «брюстеровским» оптическим окном из кристаллического кварца. Разрядный канал закрыт рубашкой охлаждения, под которой пропускается вода, а стеклянные концы разрядного канала соединены снаружи дополнительным обводным каналом. В эти стеклянные концы вварено также по одному электроду для создания дополнительного разряда, защищающего оптические окна от запыления изнутри.

На катодном конце рубашки охлаждения закреплен миниатюрный вакуумный вентиль. Хотя активный элемент и является отпаянным, наличие вентиля создает определенные удобства. Для увеличения срока службы активный элемент содержит два подогревных геттера, с этой же целью увеличен и запас газа в нем. Для этого к области катода через сильфон подсоединен дополнительный балластный объем (~ 1 л). Активный элемент наполнен аргоном при давлении ~ 147 Па (1,1 мм рт. ст.). Это давление обеспечивает максимальную выходную мощность, а напряжение на активном элементе составляет 475 В при токе 50 А, что создает достаточный запас при колебаниях напряжения сети.

Путь светового луча в резонаторе лазера герметизирован. Предусмотрена также возможность продувки этих герметизированных зон для удаления пыли и различных продуктов, образующихся под действием ультрафиолетового излучения разряда во время работы лазера.

Часть энергии луча, выходящего из резонатора лазера, отводится с помощью ненапыленной кварцевой делительной пластинки и подается на кремниевый фотодетектор, установленный на выходном конце лазера. Этот фотодетектор используется при стабилизации выходной мощности

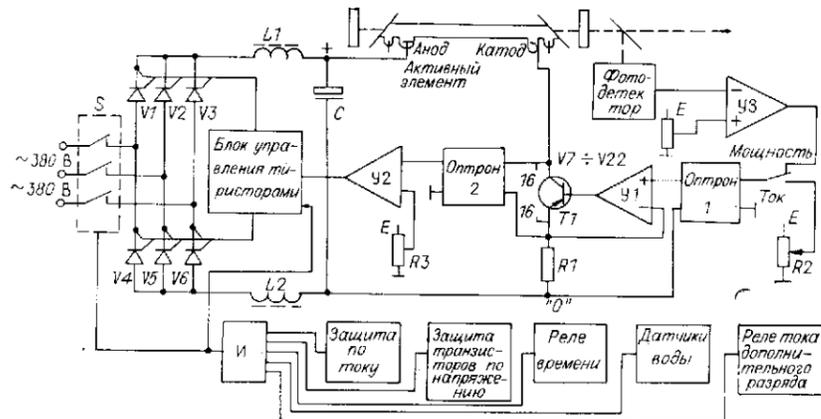


Рис. 2. Функциональная схема блока управления

и для контроля ее уровня. Излучатель имеет габариты $200 \times 230 \times 2150$ мм и массу ~ 100 кг. В кожухе, закрывающем излучатель, предусмотрены люки, открывающие доступ к юстировочным узлам призмы и эталона. Все электрические цепи оканчиваются разъемами, находящимися на боковой панели. На этой же панели расположены штуцеры для подвода охлаждающей воды, а также газа для продувки оптики.

Блок управления лазером обеспечивает поджиг разряда, поддержание разрядного тока в лазере и стабилизацию излучаемой мощности по сигналу фотодетектора. В блоке предусмотрена регулируемая защита по максимальному току (10—62,5) А, защита при падении давления воды в системе охлаждения, защита катода активного элемента при изменении газового состава, защита активного элемента и самого блока от высокого напряжения в момент поджига и при других нестационарных режимах.

Отличительная особенность схемы блока — использование двух регуляторов: медленного тиристорного регулятора выпрямленного напряжения и быстрого транзисторного источника тока, непосредственно поддерживающего разряд в активном элементе. В этой схеме задачей тиристорного регулятора является обеспечение наиболее экономичного режима транзисторов, а задачей транзисторного источника тока — подавление остаточных пульсаций выпрямленного напряжения, пульсаций мощности, вносимых питанием катода, и других быстрых возмущений.

На рис. 2 изображена функциональная схема блока, который работает следующим образом. Переменное напряжение сети 380 В после пускателя S поступает на 3-фазный двухполупериодный тиристорный выпрямитель, обеспечивающий на выходе регулируемое напряжение от 0 до 535 В. Далее, с помощью фильтров $L1$, $L2$, C сглаживаются пульсации напряжения до величины ~ 8 В при максимальном токе. Положительный вывод выпрямителя подключается к аноду лазера, а отрицательный вывод через резистор $R1$ и группу соединенных параллельно транзисторов $V7 - V22$ — к катоду лазера. Транзисторы $V7 - V22$, резистор $R1$, напряжение на котором (относительно точки «0») пропорционально току, и операционный усилитель $У1$ представляют собой источник тока. На вывод «+» $У1$ через оптрон подается регулируемое напряжение ($R2$ — регулятор тока) или напряжение обратной связи в кольце стабилизации излучаемой мощности. Выходное динамическое сопротивление источника тока на частоте 300 Гц ~ 5 кОм, а так как динамическое сопротивление активного элемента лазера ~ 5 Ом, то происходит значительное подавление пульсаций на частоте сети и ее гармоник. Единичное усиление в кольце обратной связи источника тока имеет место на частоте ~ 30 кГц; в этой точке его выходное динамическое

сопротивление примерно равно динамическому сопротивлению активного элемента.

Кольцо стабилизации мощности состоит из фотодетектора (размещаемого в арматуре лазера) и дифференциального усилителя УЗ. Резистор R4 — регулятор мощности. В режиме стабилизации мощности напряжение на выходе фотодетектора с точностью до статической ошибки кольца поддерживается на уровне напряжения на движке регулятора R4 путем регулирования разрядного тока лазера. При стабилизации мощности взаимодействуют все три кольца обратной связи: сигнал с выхода УЗ управляет источником тока, а У2 и блок управления тиристорами поддерживают напряжение на транзисторах V7 — V22. Усиление в кольце стабилизации мощности $\approx 10^3$, частота единичного усиления ~ 5 кГц.

В системе водяного охлаждения блока и лазерной трубки установлены датчики, которые при отсутствии (или недостаточном давлении) воды закрывают тиристоры V1 — V6 и выключают пускатель S. Такое же отключение происходит при превышении током в лазере допустимого уровня или при исчезновении разряда в цепи анодного дополнительного электрода.

В схеме блока управления предусмотрено устройство, позволяющее поджигать разряд в активном элементе на малом токе и этим защищать его от теплового удара, а также устройство, защищающее транзисторы V7 — V22 от перегрузки как в момент поджига, так и при любом резком изменении состояния системы питания лазера.

Реле времени осуществляет задержку включения питания активного элемента (и поджига) на время, необходимое для прогрева катода.

Основные параметры блока следующие: выходное напряжение 60—480 В, разрядный ток 5—62,5 А, пульсации тока не более 0,1 %, максимальная выходная мощность 30 кВт, КПД 97 %, масса ~ 80 кг, габаритные размеры $405 \times 439 \times 768$ мм. На панели управления размещены два измерительных прибора, показывающие ток разряда, напряжение на трубке и излучаемую мощность (с переключением), а также лампы индикации сетевого напряжения, включения блока, подачи напряжения на трубку, аварийного состояния системы охлаждения и трубки. Здесь же расположены регуляторы тока и мощности и переключатель режима работы. При необходимости панель управления может быть выполнена в виде выносного нуля.

Характеристики прибора. Оптический резонатор лазера образован выходным сферическим зеркалом с радиусом кривизны 6 м и плоским глухим зеркалом. Такая конфигурация используется, если предполагается работа с широким спектром, на многих линиях одновременно. Если необходимо работать на какой-либо выделенной длине волны, вместо плоского зеркала устанавливается призма Литрова. Плоское зеркало и призма имеют широкополосные диэлектрические покрытия с коэффициентом пропускания менее 0,5 %. Коэффициент пропускания выходного зеркала оптимизирован для получения максимальной выходной мощности на длине волны 0,514 мкм и равен ~ 18 % в диапазоне 0,48—0,514 мкм. Типичное значение выходной мощности в режиме генерации всего спектра составляет 16—18 Вт. Лазер генерирует в моде TEM₀₀ с вертикальной поляризацией.

Приведем результаты измерения выходной мощности при перестройке длины волны генерации по различным линиям с помощью призмы:

λ , мкм	0,465	0,472	0,476	0,488	0,496	0,501	0,514
P, Вт	0,27	0,72	2,58	7,1	2,1	1,26	7,4

Прибор может работать также в режиме генерации одной частоты в спектре выходного излучения, обеспечивая при этом высокую монохроматичность. Для получения одночастотного режима в резонатор вводится дополнительный селектирующий элемент — эталон Фабри — Перо, изготовленный из плоскопараллельной пластины плавящего кварца толщиной 10 мм. На обе ее поверхности нанесены диэлектрические покрытия с отражением 20 %.

Для установки эталона используется уже упоминавшийся дополнительный юстировочный узел. Выходная мощность в одночастотном режиме на длинах волн 0,514 и 0,488 мкм равна 3,5 Вт.

Как уже отмечалось, прибор может работать в двух режимах стабилизации: «по току» и «по свету». В режиме стабилизации тока разряда обеспечивается стабильность среднего уровня мощности. Однако при этом в выходной мощности присутствуют возмущения с частотами, кратными частоте питающей сети вплоть до 300 Гц. Основной вклад здесь дает частота 50 Гц, что связано с влиянием катода, который питается переменным напряжением и электрически несимметричен по отношению к разряду.

Величина пульсаций зависит от тока разряда, уменьшаясь с его увеличением. При небольших значениях тока ~ 25 А их величина примерно составляет 3—5 %, а при токе 40 А и выше — 1 %.

В режиме стабилизации «по свету» уровень пульсаций в выходной параметрам аналогичен приборам таких фирм, как, например, «Spectra Physics». Эксплуатация в течение ряда лет нескольких образцов приборов, использовавшихся для накачки нерезонансных лазеров, а также для других целей, показала, что работа с прибором не вызывает затруднений, а его практический ресурс составляет ~ 300 ч. Ресурс может быть существенно увеличен при использовании более жесткой вакуумной технологии, применяемой обычно в промышленном технологическом процессе.

Следует также отметить, что при незначительной модификации прибора возможности его применения могут быть расширены. Например, при использовании эталона с электрическим управлением (зеркала при этом закрепляются на пьезоэлементах) появляется возможность точного управления частотой генерации лазера. В этом случае он может быть использован в таких тонких экспериментах, как, например, спектроскопия сверхвысокого разрешения и других.

Если же необходимо увеличить выходную мощность, это легко сделать, соединив последовательно арматуры двух лазеров с помощью соединительных вставок. В этом случае можно рассчитывать на выходную мощность на уровне ~ 35 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gordon E. I., Labuda E. F., Bridges W. B. Continuous visible laser action in singly ionized argon, krypton, and xenon // *Appl. Phys. Lett.* — 1964. — 4, N 10. — P. 178.
2. Rigden J. D. A metallic plasma tube for ion lasers // *IEEE J. Quant. Electron.* — 1965. — QE-1, N 5. — P. 221.
3. Labuda E. F., Gordon E. I., Miller R. C. Continuous-duty argon ion lasers // *IEEE J. Quant. Electron.* — 1965. — QE-1, N 6. — P. 273.
4. Herquist K. G., Fendley J. R. Construction on long-life argon lasers // *IEEE J. Quant. Electron.* — 1967. — QE-3, N 2. — P. 66.
5. Хьючитал, Ригден. Долговечная конструкция газового лазера на разряде с полым катодом // *Приборы для науч. исслед.* — 1968. — 68, № 10.
6. Paanen R. Continuously-operated ultraviolet lasers // *Appl. Phys. Lett.* — 1966. — 9, N 1. — P. 34.
7. Ebert W., Redlich I. Ein kontinuierlicher Edelgas Ionen Laser für hohe Ausgangsleistungen // *Exp. Techn. Phys.* — 1974. — 22, N 3. — P. 197.
8. Seeling W. H., Banse K. W. Argon laser emits 150 W c-w // *Laser Focus.* — 1970. — 6, N 8. — P. 33.
9. Muuss H., Schoenmakers H. High-power argon ion laser with titanium covered discharge tube // *Appl. Phys.* — 1978. — 15. — P. 229.
10. Алферов Г. Н., Донин В. И., Юршин Б. Я. Аргонный ОКГ непрерывного действия с выходной мощностью 0,5 кВт // *Письма в ЖЭТФ.* 1973. — 18, № 10.
11. Розбери В. Справочник по вакуумной технике и технологии. — М.: Энергия, 1972.

Поступила в редакцию 13 декабря 1989 г.