

Г.В. Колбычев, П.Д. Колбычева, О.Б. Забудский

НАКАЧКА ПРОДОЛЬНЫМИ ПУЧКАМИ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

Сообщается о результатах работ по созданию лазера на парах металлов с продольной накачкой пучками убегающих электронов (ПУЭ). Исследовалась проблема транспортировки ПУЭ по узкой и длинной лазерной трубке. Найден оптимальный вариант магнитной системы совмещения нескольких электронных лучей в один и проводки его по оси лазера. Приведены результаты испытания лазерных кювет с парами кадмия и цинка. Полученные данные дают основу для разработки лазеров на парах других химических элементов.

Пучки убегающих электронов (ПУЭ), генерируемые с эффективностью 60—80% в газе среднего давления [1, 2], могут найти применение в лазерной технике. Наносекундный диапазон длительностей импульсов ПУЭ, высокая частота повторения импульсов (вплоть до сотен килогерц), а также рабочий диапазон давлений буферного газа (1–20 кПа) делают ПУЭ привлекательными для накачки самоограниченных лазеров на парах металлов. Хотя генераторы ПУЭ и работоспособны в атмосфере паров металлов (в геометрии полых катода и анода [3]), технически более простым представляется продольный вариант, когда генератор вынесен в холодную область лазерной кюветы, и ПУЭ инжектируется в нагретую зону вдоль оси лазера. В этом случае, однако, возникает ряд проблем, связанных с необходимостью обеспечения качественного поворота, сжатия, удержания и проводки сильно поглощаемого электронного луча по длинному и узкому лазерному каналу. При реализуемых на практике скоростях нарастания тока ПУЭ в пучковой плазме должны проявиться процессы зарядовой нейтрализации пучка, пучково-плазменного разряда, генерация различного рода колебаний и неустойчивостей и т.п. [4, 5], что способно существенно изменить транспортировку ПУЭ в рабочей зоне кюветы. Отметим, что уровень теоретических исследований не позволяет оценить роль этих факторов в наших конкретных условиях, а опытные данные получены в основном для пучков релятивистских электронов. Поэтому выяснение действительной картины распространения ПУЭ в лазерной кювете явилось нашей первоочередной задачей. Следующим этапом была отработка оптимального варианта системы управления электронными пучками, обеспечивающего максимальный энерговклад ПУЭ в рабочей зоне лазера. И, наконец, третий этап работы заключался в разработке и испытании лазерной кюветы на парах металлов с накачкой несколькими ПУЭ. Результатам этих работ и посвящено настоящее сообщение.

1. Измерение электрических полей в пучковой плазме

Исследования выполнены на кювете в виде отрезка стеклянной трубки с внутренним диаметром 16 и общей длиной 260 мм. На одном ее торце помещен генератор ПУЭ, а на другом – подвижный вдоль оси коллектор ПУЭ. По всей длине кюветы с интервалами в 20 мм размещены 12 электростатических зондов в виде радиально направленных отрезков Мо-провода диаметром 50 мкм и длиной 7 мм. На кювету надеты секции соленоида длиной 18 мм каждая с зазором между ними 4 мм, что обеспечило достаточно однородное магнитное поле и одновременно доступ к контактам зондов. Сигналы с зондов поочередно снимались с помощью омического делителя напряжения, размещенного в съемном замке, и подавались на осциллограф С1–55, синхронизованный с генератором ПУЭ.

Питание генератора ПУЭ осуществлялось подключением к его катоду через тиратрон ТГИ1–1000/25 заряженного конденсатора марки КВИ–3 емкостью 1 нФ. Напряжение зарядки U_0 варьировалось в пределах $7 \div 11$ кВ. При рабочем давлении гелия в кювете $1 \div 3$ кПа средняя энергия электронов в пучке составляла $\sim 0,8 U_0$. Частота следования импульсов ПУЭ–250 Гц. Ток ПУЭ на коллекторе и анодный ток измерялись с помощью омических шунтов сопротивлением 5 и 1 Ом соответственно. Погрешность, вносимая зондами в распределение потен-

циала в кювете, по нашим оценкам, не превышала 30 В, что мало по сравнению с измеряемыми величинами.

Испытания показали, что в отсутствие аксиального магнитного поля ПУЭ практически полностью рассеивается на первых 130÷170 мм пробега вдоль кюветы. Поэтому при определении профиля электрического поля в пучково-плазменном шнуре коллектор был установлен на расстоянии 140 мм от анода генератора ПУЭ.

На рис. 1 приведены результаты измерений профиля объемного потенциала ϕ вдоль кюветы при различных значениях напряжения питания генератора ПУЭ и давления гелия для двух случаев: когда аксиальное магнитное поле отсутствует и его величина составляет 30 кА/м. Типичная осциллограмма импульса потенциала на середине длины кюветы и его соотношенность к импульсу тока ПУЭ на коллекторе приведены на рис. 2.

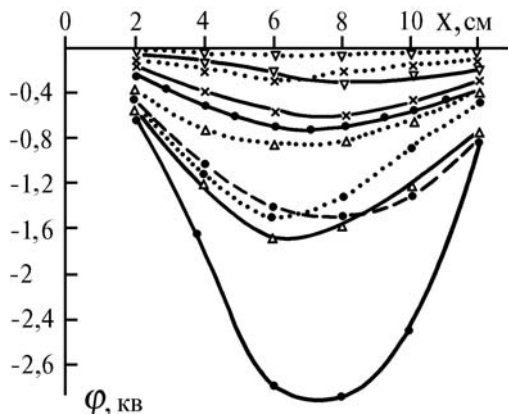


Рис. 1. Распределение объемного потенциала по длине кюветы. Аноду генератора соответствует $x = 0$, коллектору – $x = 140$ мм. Давление гелия: ∇ – 1,66 кПа; крестики – 2,0; треугольники – 2,33; точки – 2,66 кПа. Напряжение питания генератора: штрихпунктирные линии – 7 кВ; штриховые – 9; сплошные – 11 кВ; точки – при включенном аксиальном магнитном поле напряженностью 30 кА/м и напряжении питания генератора 11 кВ

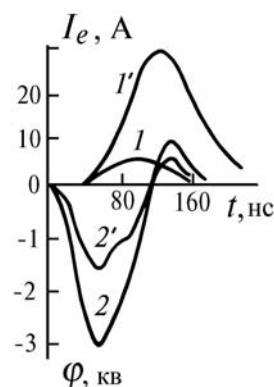


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока ПУЭ на коллекторе (I, I') и объемного потенциала в середине кюветы (ϕ, ϕ') при выключенном аксиальном магнитном поле ($I, 2$) и при его включении ($I', 2'$). Давление гелия 2,66 кПа, напряжение питания 11 кВ

Эксперимент дал следующие результаты:

1. Во всех без исключения случаях наблюдается схожая картина. Во-первых, объемный потенциал монотонно возрастает от анода к середине длины кюветы, а затем так же монотонно падает к коллектору. Во-вторых, сигнал на зондах достигает своего максимума уже в самом начале появления ПУЭ в кювете, когда его ток еще мал. К моменту возрастания тока ПУЭ до его амплитудного значения потенциал успевает существенно снизиться. Это снижение относительно амплитуды тем больше, чем выше напряжение питания генератора, т. е. чем больше ток ПУЭ и скорость его нарастания [1]. Заметим также, что появление сигналов на зондах вплоть до достижения ими амплитудного значения происходило одновременно; во всяком случае, их неодновременность в масштабе длительностей импульсов была незаметна. Изменения временных параметров импульсов потенциала по длине кюветы также были в пределах погрешности измерений ($\pm(5\div 7\%)$). Различия наблюдаются лишь в форме заднего фронта импульсов, полученных при низких давлениях газа и низких напряжениях питания генератора ПУЭ.

2. Под действием заряда ПУЭ в дрейфовом пространстве между анодом и коллектором возникает сильное электрическое поле с напряженностью в сотни Вольт на сантиметр, вызывающее коронирование коллектора и появление компенсационного тока на электродах. В отсутствие аксиального магнитного поля компенсационный ток стекает по преимуществу на анод, поскольку прианодная плазма обладает более высокой проводимостью. Измерения показали, что даже при малом расстоянии между анодом и коллектором (~45 мм) от трети до половины анодного тока составляет компенсационный ток из дрейфового пространства. Установлено, что при напряженности электрического поля в кювете свыше 100 В/см в примыкающем к аноду участке дрейфового пространства возникает пучково-плазменный разряд; его свидетельством может служить появление выброса обратной полярности на осцилло-

граммах сигналов на ближних к аноду зондах. С повышением напряжения питания генератора ПУЭ или давления газа в кювете область, занимаемая пучково-плазменным разрядом, расширяется к коллектору, но никогда не достигает последнего, несмотря на весьма высокую здесь напряженность электрического поля.

3. С включением аксиального магнитного поля напряженностью 30 кА/м пучковая плазма приобретает вид шнура диаметром ~ 8 мм, имеющего почти одинаковую яркость на всей длине от анода до коллектора. Объемный потенциал при этом уменьшается в 2 (при высоких давлениях гелия) – 4 раза (при низких давлениях), а ток ПУЭ на коллекторе возрастает в 4–6 раз, причем возрастание тока на коллекторе сопровождается уменьшением на ту же величину тока на аноде. Распределение потенциала вдоль кюветы при включении магнитного поля качественно не изменяется (см. рис. 1).

4. Анализ процессов, протекающих в дрейфовом пространстве во время нарастания потенциала в нем, показал, что исходной характеристикой электрического поля здесь является приведенная напряженность E/P , а исходным параметром – скорость нарастания тока ПУЭ (dI_e/dt), задаваемая генератором. Для важного в практическом плане случая пучка в аксиальном магнитном поле обработка экспериментальных данных позволила установить следующую зависимость величины поля в момент максимума сигнала на зондах от скорости нарастания тока ПУЭ: $E/P \sim (dI_e/dt)^{0,5 \pm 0,04}$. Здесь E – напряженность поля в прианодной области дрейфа. Заметим также, что поскольку амплитудно-временные параметры импульса тока ПУЭ сильно зависят от условий генерации [1, 2], то на практике наблюдается показанная на рис. 1 картина: величина объемного потенциала в дрейфовом пространстве сильно возрастает с увеличением давления гелия и напряжения питания генератора.

Итак, проведенные исследования позволили выявить условия, при которых объемный потенциал электрического поля в дрейфовом пространстве, инициированный проходящим ПУЭ, начинает оказывать существенное влияние на транспортировку пучка. Найденны зависимости, позволяющие экстраполировать результаты настоящего эксперимента на случай кювет большей длины и иных параметров импульсов тока ПУЭ, что важно для применения ПУЭ в системах накачки лазеров.

2. Обработка магнитной системы лазера

Было опробовано несколько вариантов магнитных систем для удержания с последующим совмещением электронных пучков от нескольких электронных пушек, сжатия и поворота суммарного пучка, ввода его в узкий лазерный канал и проводки вдоль него. С этой целью были испытаны магнитные призмы и линзы в сочетании с широко- и узкоапертурными соленоидами.

Испытания показали, что наибольшие трудности связаны с согласованием вышеречисленных операций между собой, поскольку каждая из них требует собственной конфигурации магнитного поля. Так, широкоапертурные соленоиды препятствуют совмещению нескольких электронных лучей. Короткофокусные линзы также неэффективны при совмещении нескольких лучей, но вполне применимы, если полного совмещения не требуется. Очень экономичными оказались миниатюрные магнитные призмы, однако они плохо согласуются с системами удержания пучков, вследствие чего эффективность ввода суммарного пучка в узкий лазерный канал не превышает 50–60%. Наилучшие результаты были получены при использовании узких соленоидов. В этом случае подбором расположения электронных пушек и соленоида удалось выполнить все операции с суммарной эффективностью $\sim 90\%$. При напряженности поля 70–100 кА/м обеспечивается сжатие пучково-плазменного шнура в 2 раза по сравнению с диаметром исходного единичного луча, генерируемого отдельной электронной пушкой.

Для проектирования лазерной кюветы важно знать глубину проникновения ПУЭ в газовую среду. Поэтому были проведены измерения этой характеристики при давлении гелия 1–2 кПа и напряженности аксиального магнитного поля 100 кА/м. Оказалось, что она составляет $\sim 0,7$ от полной длины пробега электронного пучка, определяемой из соотношения Бете [6].

3. Исследования накачки паров металлов пучками УЭ

На первом этапе была испытана кювета с одной электронной пушкой, размещенной на одном конце кюветы. На другом конце, на расстоянии 500 мм от пушки, расположен коллектор электронов. Пушка размером 30 × 30 × 6 мм генерировала ПУЭ диаметром 11 мм с энер-

гией $6 \div 11$ кэВ при количестве электронов в импульсе $(1 \div 3) \cdot 10^{13}$. Центральная часть кюветы диаметром 12 мм, длиной 360 мм, имеющая отступки с навесками металла, помещена в соле-ноид и нагревалась до рабочей температуры. Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой, размещенной снаружи у основания отступков. Внешний резонатор образован глухим сферическим зеркалом с радиусом кривизны 1 м и плоским зеркалом с коэффициентом отражения 99%. При работе с парами кадмия была получена лазерная генерация как па зеленой (537 нм), так и на синен (441,6 нм) линиях. На рис. 3 приведены осциллограммы импульсов тока ПУЭ на коллекторе и лазерной генерации. Генерация начиналась, как и в газоразрядном лазере, с температуры 555°К ($N_{cd} \sim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и росла с увеличением N_{cd} вплоть до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Выше температуру не поднимали во избежание напыления металла на окна кюветы. Оптимальное давление гелия $1,64 \div 2$ кПа.

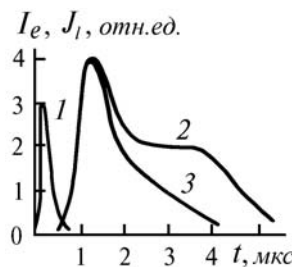


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока ПУЭ на коллекторе (1), лазерной генерации на 537 нм (2) и на 441,6 нм (3) в парах кадмия. Температура 565°К, давление гелия 1,64 кПа. Напряжение питания генератора ПУЭ 11 кВ

На втором этапе была испытана кювета с попарно расположенными на обоих концах генераторами ПУЭ вышеописанной конструкции и теми же параметрами пучка. Расстояние от генераторов до входа в лазерный канал 70 мм. Коллектор размещался в середине рабочей зоны кюветы, имеющей длину 500 мм и диаметр 12 мм, на которую намотано 100 витков соленоида. Поверх соленоида размещен нагреватель, хотя его функцию могла бы выполнять и обмотка электромагнита. Все 4 генератора ПУЭ включались одним тиратроном ТГИ1–1000/25, при этом работа генераторов была в достаточной степени синхронной. Питание электромагнита осуществлялось от генератора тока, формирующего однополярные синусоидальные импульсы амплитудой до 700 А и длительностью 20 мкс, следующие с частотой до 500 Гц. Кювета заполнялась парами цинка и гелием при давлении до 3 кПа.

Испытания показали хорошее совмещение электронных лучей в один шнур диаметром $5 \div 6$ мм, ориентированный точно по оси кюветы. Была получена лазерная генерация на длине волны 492 нм на переходе иона цинка. Временная картина генерации аналогична приведенной на рис. 3, полученной в парах кадмия. Хотя порог по накачке в лазере на парах цинка в ~ 3 раза выше, чем в парах кадмия [7], возбуждения пучком от одной пушки было достаточно для получения лазерной генерации и на цинке.

Итак, в результате проведенных исследований выявлены особенности транспортировки ПУЭ в длинных и узких диэлектрических каналах, отработана магнитная система управления накачкой от нескольких генераторов ПУЭ, успешно испытаны конкретные варианты лазерных кювет. Полученные данные являются основой для разработки лазеров на парах металлов, представляющих интерес для практических приложений.

1. Бохан П. А., Колбычев Г. В. //ЖТФ. 1981. Т. 51. №9. С. 1823–1831.
2. Колбычев Г. В., Самышкин Е. А. //ЖТФ. 1981. Т. 51. №10. С. 2023–2037.
3. Бохан П. А., Сорокин А. Р. //Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. №10. С. 620–623.
4. Власов М. А. и др. //Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. №11. С. 652–655.
5. Валуев А. А., Сопин П. И., Сорокин Г. А. //ТВТ. 1989. Т. 27. №4. С. 642–649.
6. Гузденко Л. И., Яковленко С. И. Плазменные лазеры. М.: Атомиздат, 1978. 256 с.
7. Иванов И. Г. //Автометрия. 1984. №1. С. 19–34.

G. V. Kolbychev, P. D. Kolbycheva, O. B. Zabudskii. **Longitudinal Pumping of Metal-Vapor Lasers by Runaway Electron Beams.**

Some results of experiments on developing metal-vapor lasers with the longitudinal pumping by runaway electron beams (REB) are presented. The problems of the REB propagation through a long and narrow laser tube are studied. An optimal version of a magnetic system arrangement capable of superposing several REBs into a single narrow beam and guiding it along a laser tube axis with a high overall efficiency is proposed. Laser tubes are designed and laser emission has been observed in Cd- and Zn-vapors pumped by REB. The data obtained can make a basis for developing and constructing lasers on vapors of other chemical elements as well.