

# Лазер на парах меди с эффективным полупроводниковым генератором накачки с соизмеримыми длительностями импульсов накачки и генерации

А.А.Юркин

*Представлены результаты экспериментального исследования лазера на парах меди с полупроводниковым генератором накачки, формирующим практически оптимальные импульсы накачки с крутизной нарастания тока активного элемента KULON LT-1.5CU приблизительно 40 А/нс. Для поддержания рабочей температуры канала активного элемента использовался дополнительный импульсный генератор подогрева. Показана высокая эффективность использованного генератора накачки.*

**Ключевые слова:** лазер на парах меди, оптимальные импульсы накачки, эффективность накачки, полупроводниковый генератор накачки, согласование, генерация.

## 1. Введение

Несмотря на большой прогресс в изучении и разработке лазеров на парах меди (ЛПМ) [1], перспективных по своим потенциальным параметрам в ряду импульсных лазеров видимого диапазона излучения, некоторые ключевые параметры и технические характеристики создаваемых ЛПМ все еще далеки от возможных. Например, эффективность лазерной генерации на порядок меньше возможной из-за проблем, связанных с созданием близких к оптимальным источников накачки и с их согласованием с лазерной трубкой [2].

Для ЛПМ, в которых активным элементом (АЭ) служит отпаянная саморазогревающая газоразрядная лазерная трубка, требования к оптимальной накачке, при которой можно ожидать высокой эффективности генерации, хорошо известны [3]: при минимально возможной длительности фронта длительность импульса тока разряда должна быть близкой к длительности импульса лазерной генерации (10–50 нс), а частота следования высоковольтных импульсов накачки – достаточной для разогрева разрядного канала до рабочей температуры. При этом релаксация нижних, метастабильных лазерных уровней должна эффективно осуществляться за межимпульсный промежуток времени. Однако при уменьшении тем или иным способом длительности импульса накачки и его фронта наблюдается заметный рост мощности, потребляемой АЭ, что связано с увеличением рассеяния ВЧ электромагнитного излучения на нем и в контуре питания. Вследствие этого обстоятельства попытки создания и применения генераторов накачки с улучшенными характеристиками зачастую наталкиваются на трудности в достижении рабочей температуры газоразрядного канала АЭ [4]. Решить эту проблему для саморазогреваемых трубок можно посредством применения для разогрева газоразрядного канала дополнительного, относительно низковольтного им-

пульсного разряда, синхронизованного с импульсами накачки. Такой подход является компромиссным, позволяющим повысить мощность и КПД лазера при оптимальной накачке, но при этом их предельные, потенциально возможные значения не достигаются.

Еще одной важной для ЛПМ задачей является создание полупроводниковых генераторов накачки, более компактных, дешевых и имеющих больший ресурс работы, чем ламповые и тиратронные генераторы, что особенно актуально при создании приборных, коммерческих вариантов ЛПМ. Однако пока параметры, достигнутые при реализации предлагаемых решений, не превосходят, а скорее уступают параметрам лучших образцов ЛПМ с ламповыми и тиратронными генераторами [5–7].

Настоящая работа нацелена на решение указанных проблем. Представлены результаты исследования работы ЛПМ с полупроводниковым источником питания с соизмеримыми длительностями импульсов накачки и лазерной генерации и с дополнительным подогревом газоразрядного канала АЭ импульсным разрядом. Эксперименты проводились с использованием промышленного АЭ KULON LT-1.5CU производства НПП «Исток» (давление буферного газа неона – 600 мм рт. ст., диаметр разрядного канала 0.7 см, длина канала 17.5 см, паспортная мощность излучения 1.5 Вт).

## 2. Схема питания АЭ

Принципиальная схема питания АЭ показана на рис.1. Схема формирует высоковольтные (~10 кВ) импульсы накачки и импульсы подогрева с амплитудой в несколько сотен вольт, которые объединены на электродах АЭ. При этом импульсы подогрева синхронизованы с импульсами накачки таким образом, что могут подаваться на АЭ с задаваемыми задержкой или опережением по отношению к импульсам накачки.

Генератор накачки АЭ работает следующим образом. При включении транзистора 5 подачей на затвор прямоугонного импульса напряжения длительностью  $\pi(LC)^{1/2}$  емкость  $C$  заряжается до примерно удвоенного выпрямленного сетевого напряжения. Сразу после этого откры-

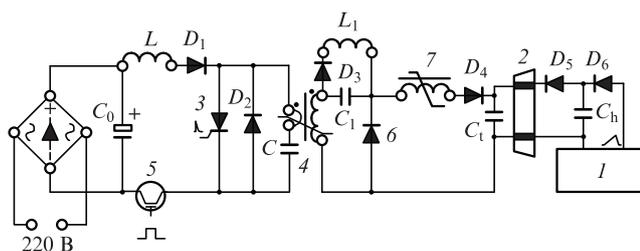


Рис.1. Принципиальная схема питания АЭ:

1 – импульсный генератор подогрева; 2 – АЭ KULON LT-1.5CU; 3 – две сборки по 12 параллельно включенных тиристоров КУ221А(Б,В); 4 – сборка из четырех импульсных трансформаторов (соотношение витков 1/3, сердечники из восьми ферритовых колец М1000НМ с размерами  $20 \times 10 \times 8$  мм, первичные витки соединены параллельно, вторичные – последовательно); 5 – транзистор IRG4PH50UD; 6 – цепочка из 11 диодов КД203Г(Д); 7 – насыщающийся дроссель (восемь витков, сердечник из двух ферритовых колец М2000НМ  $18 \times 8 \times 5$  мм);  $C_1$  – емкость КВИ-3 ( $3.3 \text{ нФ} \times 10 \text{ кВ}$ );  $C$  – емкость 4 К78-2 ( $0.1 \times 1000$ );  $C_h$  – емкость ( $0.1 \times 1000$ );  $L$  – индуктивность ( $80 \text{ мкГн}$ );  $L_1$  – индуктивность ( $20 \text{ мкГн}$ );  $D_1$  – три параллельно включенных диода FR607;  $D_2, D_4$  – диоды FR607;  $D_3, D_5$  – цепочка из 12 диодов FR607;  $D_6$  – диод HER308.

ваются тиристоры 3 и происходит быстрый разряд емкости  $C$  на первичную обмотку трансформатора 4. При этом две сборки тиристоров в блоке 3 запускаются поочередно, что обеспечивает надежную работу на частотах до 13 кГц. Для формирования высоковольтных импульсов с крутым фронтом используется известное явление резкого восстановления проводимости диодов при прохождении обратного тока [8]. В схеме, при прямом токе во вторичной цепи блока 4, происходит быстрая зарядка емкости  $C_1$  с одновременным насыщением сердечника блока 4. А при резком обрыве обратного тока в цепочке 6 формируется высоковольтный импульс с крутым фронтом, и энергия, запасенная в индуктивности вторичной обмотки блока 4, поступает на АЭ. Насыщающийся дроссель 7 служит для задержки подачи импульса напряжения на АЭ. Его параметры, а также емкости  $C_1$  и  $C_1$  в значительной мере определяют характеристики формируемого импульса накачки. Цепочка  $D_3$ – $L_1$  служит для использования энергии обратного колебания тока в первичной цепи блока 4 для нагрева АЭ.

Характерные осциллограммы импульсов тока в цепочке 6 и АЭ в разогретом состоянии, зарегистрированные с помощью трансформатора тока – пояса Роговского, представлены на рис.2.

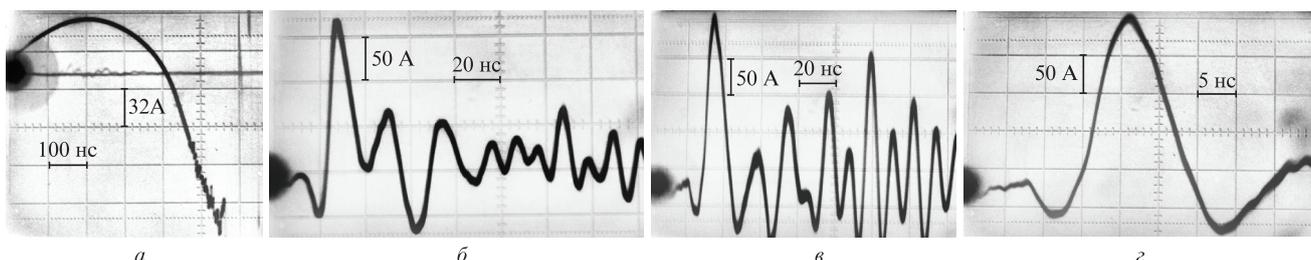
Видно, что с уменьшением  $C_1$  согласование генератора накачки с АЭ ухудшается, но возрастают амплитуда и крутизна нарастания тока, что приводит к увеличению эффективности импульса накачки АЭ и, следовательно, к росту энергии импульса лазерной генерации.

Импульсный генератор подогрева 1 синхронно с импульсами накачки вырабатывает импульсы микросекундного диапазона длительности, заряжающие емкость  $C_h$ , которая разряжается на сопротивление распадающейся плазмы разрядного канала АЭ, разогревая его. Регулируемой мощности генератора 1 (до 400 Вт) с запасом хватает для разогрева канала АЭ до максимально разрешенной температуры  $1600^\circ\text{C}$ . В отсутствие дополнительного подогрева канал разогревается импульсами накачки лишь до  $1100^\circ\text{C}$ , генерация же начинается при достижении  $\sim 1300^\circ\text{C}$ . Мощность, потребляемая источником питания АЭ от сети, не превышает 1200 Вт.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В экспериментах использовался полуконфокальный резонатор длиной 50 см с «глухим» сферическим зеркалом и со стеклянной плоскопараллельной пластиной в качестве выходного зеркала резонатора. Импульсы лазерной генерации регистрировались быстрым фотодиодом. Температура газоразрядного канала АЭ контролировалась с помощью пирометра. Наличие импульсного генератора подогрева 1 позволяло работать при различных параметрах импульсов накачки, не беспокоясь о достижении рабочей температуры АЭ.

С технической точки зрения удобнее было подавать импульсы подогрева с опережением импульсов накачки, т.к. в этом случае высоковольтные и высокочастотные импульсы накачки меньше влияют на работу схемы подогрева. Однако в ходе экспериментов довольно неожиданно обнаружилось негативное влияние такого режима работы на параметры лазерной генерации. Оказалось, что подача импульсов подогрева на несколько микросекунд раньше импульсов накачки вызывает сильное уменьшение мощности генерации и отношения мощностей зеленой ( $510.6 \text{ нм}$ ) и желтой ( $578.2 \text{ нм}$ ) компонент излучения, вплоть до полного исчезновения зеленой компоненты в некоторых случаях. Связано это с тем, что при наличии электрического поля даже небольшой напряженности электроны в газоразрядном промежутке быстро набирают энергию, многократно превышающую при  $T \sim 1600^\circ\text{C}$  равновесную энергию атомов Ne, равную  $\sim 0.24 \text{ эВ}$ . Процесс умножения средней энергии электронов характеризуется энергетическим коэффициентом Таунсенда  $\eta$ . В условиях эксперимента, при амплитуде напряжения импульса подогрева  $\sim 600 \text{ В}$  и, соответственно, при отношении напряженности поля к давлению газа  $\sim 0.06 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мм рт.ст.}^{-1}$ ,  $\eta \sim 25$  [9]. Поэтому энергии электронов заведомо достаточно для возбуждения (заселения) нижних, метастабильных лазерных уровней с энергиями  $\sim 1.39$  и  $1.64 \text{ эВ}$ . Особенно сильно заселяется более низкий из них, являющийся нижним уровнем перехода, ответственного за зеленую линию

Рис.2. Осциллограммы токов в цепочке диодов 6 (а) и АЭ при  $C_1 = 120$  (б) и 70 пФ (в, з).

генерации, чем и объясняется ее сильное подавление. В дальнейшем эксперименты проводились в режиме подачи импульсов подогрева с задержкой относительно импульсов накачки в несколько микросекунд.

В ходе экспериментов были оптимизированы параметры дросселя 7 и емкостей  $C_1$ ,  $C_t$ . Критерием служило, прежде всего, получение максимальной средней мощности лазерного излучения, а не согласование генератора накачки с АЭ. Оптимальной емкостью является резонансная емкость  $C_1 \sim C/n^2$ , где  $n$  – коэффициент трансформации блока 4. С уменьшением емкости  $C_t$  улучшаются характеристики импульса накачки и растет энергия импульса генерации, но ухудшается согласование генератора накачки с АЭ и уменьшается его вклад в разогрев канала АЭ. Соответственно, для поддержания температуры канала необходимо увеличивать мощность генератора подогрева. В итоге при  $C_t < 120$  пФ наблюдается слабый рост средней мощности излучения лазера, поэтому в качестве рабочей емкости использовалась  $C_t \sim 70$  пФ. Для дросселя 7 оптимальное значение произведения числа витков  $N$  на сечение сердечника  $S$  составило  $\sim 4$  см<sup>2</sup>. Следует отметить, что с ростом  $NS$  возрастает тепловая нагрузка на диоды 6, т. к. растет амплитуда напряжения на них в момент восстановления их проводимости. В результате генератор накачки обеспечивает практически оптимальные импульсы тока АЭ: длительность фронта  $\sim 6$  нс, длительность импульса по основанию  $\sim 15$  нс, крутизна нарастания тока  $\sim 40$  А/нс при амплитуде тока до  $\sim 250$  А. Для сравнения можно привести параметры магнитотристорного генератора с двумя звеньями магнитного сжатия импульса, обеспечивающего паспортные мощность и режим работы АЭ KULON LT-1.5CU из [5]: длительность импульса тока 150 нс, амплитуда 150 А, крутизна нарастания тока  $\sim 3.5$  А/нс, частота следования импульсов 15 кГц, потребление мощности от сети до 1.2 кВт.

В экспериментах, как и во многих других работах (см., напр., [10]), проявилось существенное влияние предимпульсной концентрации электронов газоразрядного промежутка на эффективность накачки АЭ. Так, например, сразу после небольшого уменьшения частоты следования импульсов накачки, до того, как упадет температура канала, наблюдается небольшой рост средней мощности излучения лазера. Впоследствии, уже после падения мощности, при компенсации снижения температуры усилением подогрева мощность возвращается к исходному уровню. С учетом этого эксперименты проводились при одной частоте следования импульсов накачки,  $\sim 12.5$  кГц. При отключении подогрева наблюдается рост мощности излучения на  $\sim 20\%$  и, кроме того, заметно улучшается согласование генератора накачки с АЭ. Все это объясняется тем, что при увеличении периода следования импульсов накачки или отключении подогрева уменьшается предимпульсная концентрация электронов и, как следствие, возрастает амплитуда напряжения на АЭ из-за более позднего пробоя разрядного промежутка, что в свою очередь вызывает более мощную лавину пробоя и приводит к росту амплитуды и крутизны нарастания тока. В результате растет эффективность импульса накачки и, следовательно, энергия лазерного импульса.

Характерные осциллограммы импульсов тока и лазерной генерации при средней мощности генерации вблизи максимальной показаны на рис.3. Временные характеристики импульсов тока и генерации практически совпадают, длительность их на полувысоте составляет  $\sim 9$  нс. С

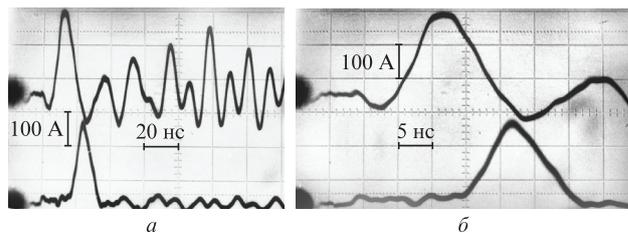


Рис.3. Осциллограммы импульсов тока (верхний луч) и лазерной генерации (нижний луч).

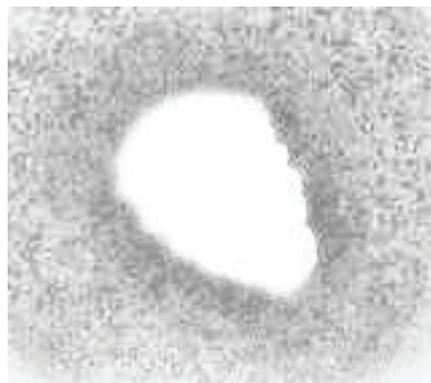


Рис.4. Фотография канала АЭ.

увеличением температуры газоразрядного канала АЭ мощность лазерного излучения растет, ее спад не наблюдается и при некотором превышении  $1600^\circ\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что метастабильные уровни, сильно заселяемые в результате воздействия импульсов генератора подогрева, практически полностью рассеиваются к следующему импульсу накачки. Отношение мощностей зеленой и желтой линий излучения падает с ростом температуры АЭ, достигая  $\sim 1/1$  при  $1550^\circ\text{C}$ ,  $\sim 3/4$  при  $1600^\circ\text{C}$  и  $\sim 3/5$  при  $1650^\circ\text{C}$ . Максимальная средняя мощность излучения, полученная при  $T = 1600^\circ\text{C}$ , составляет  $\sim 1.3$  Вт. При отключенном подогреве, до снижения температуры канала АЭ, она была равна  $\sim 1.55$  Вт. При этом измерения проводились с уже достаточно долго эксплуатировавшейся лазерной трубкой. Так, из-за термодформации канала АЭ его выходное сечение перекрывалось до уровня  $\sim 65\%$  от номинального.

С учетом этого обстоятельства можно утверждать, что с кондиционной трубкой мощность излучения будет равна  $\sim 2$  Вт, а с отключенным подогревом она составит  $\sim 2.4$  Вт. Фотография канала со стороны выходного зеркала резонатора показана на рис.4.

Вклады в разогрев канала АЭ генераторов накачки и подогрева примерно равны и составляют  $\sim 300$  Вт при температуре канала  $\sim 1600^\circ\text{C}$ . Отсюда следует, что, если обеспечить разогрев канала только от генератора накачки, можно удвоить мощность излучения и выйти на уровень 4–5 Вт! Это можно сделать, реализовав двухканальный вариант работы сборок тиристоров 3 и увеличив энергию импульса накачки. В этом случае частота следования импульсов накачки возрастет до  $\sim 20$  кГц, а мощность, потребляемая от сети, составит  $\sim 1.5$  кВт.

#### 4. Заключение

Полученные и прогнозируемые уровни мощности излучения лазера с АЭ KULON LT-1.5CU явно и значи-

тельно превышают паспортную мощность, что говорит о высокой эффективности генератора накачки. Принципы устройства представленного генератора накачки допускают масштабирование его выходных параметров, таких как амплитуды напряжения и тока, а также энергия импульса накачки, при сохранении практически оптимальных временных характеристик импульса. Это делает возможным применение данной схемы (после ее адаптации) для питания более мощных лазерных трубок с перспективой повышения мощностей излучения, получаемых в настоящее время при их использовании. При этом полупроводниковая схема питания компактна и в ней используются недорогие серийные компоненты.

Большой интерес вызывают возможность применения генератора накачки для возбуждения лазеров на галогенидах меди, требующих в сравнении с ЛПМ значительно меньших удельных мощностей для создания рабочих концентраций паров меди. Поэтому при использовании предлагаемого в настоящей работе генератора накачки для работы лазеров с трубками небольшого диаметра для их нагрева вполне достаточно мощности  $\sim 300$  Вт [11].

Автор выражает благодарность А.Н.Стародубу за помощь, оказанную при выполнении данной работы. Ра-

бота выполнена на площадке ФИАНа в СыктГУ в рамках договора о сотрудничестве между Физическим институтом им. П.Н. Лебедева и Сыктывкарским государственным университетом.

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. *Лазеры на парах меди* (М.: Физматлит, 2005).
2. Юдин Н.А. *Квантовая электроника*, **30**, 583 (2000).
3. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф., Юдин Н.А. *Квантовая электроника*, **21**, 733 (1994).
4. Костыря И.Д., Евтушенко Г.С., Тарасенко В.Ф., Шиянов Д.В. *Квантовая электроника*, **31**, 864 (2001).
5. Волков И.В., Гапченко Л.М. *Техническая электродинамика*, № 3, 23 (2000).
6. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. *ПТЭ*, № 1, 88 (2006).
7. Евтушенко Г.С., Кашаев В.Ю., Паршина Н.В. и др. *ПТЭ*, № 4, 165 (2002).
8. Месяц Г.А. *Импульсная энергетика и электроника* (М.: Наука, 2004, с. 402).
9. Мак-Даниель И. *Процессы столкновений в ионизованных газах* (М.: Мир, 1967, с.604).
10. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Дм.Э. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 715 (2013).
11. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 406 (2000).