

Е.Х. Бакшт, В.А. Визирь, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко, В.В. Червяков

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ С НАКАЧКОЙ ПРОДОЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ ОТ ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Приведены результаты экспериментальных исследований азотного лазера с накачкой продольным разрядом от генератора с промежуточным индуктивным накопителем, магнитным ключом и полупроводниковым прерывателем тока. Показано, что обострительные конденсаторы, установленные параллельно разрядной трубке, уменьшают потери энергии в полупроводниковом прерывателе тока и увеличивают в два раза энергию излучения лазера. Получены импульсная мощность лазерного излучения до 40 кВт и средняя до 12 мВт, реализован импульсно-периодический режим работы лазера с частотой повторения до 100 Гц. Делается предположение о возможности увеличения эффективности излучения капиллярных лазеров, формирующих импульсы мягкого рентгеновского излучения, при использовании индуктивных накопителей энергии.

Индуктивный накопитель энергии для накачки импульсных газовых лазеров на плотных газах был впервые применен в 1975 г. [1]. Генераторы с индуктивным накопителем энергии могут легко изменять режимы накачки и осуществлять возбуждение лазеров различного типа в оптимальных условиях [2–7]. Однако этот способ накачки импульсных лазеров сдерживался отсутствием простых и надежных прерывателей, позволяющих осуществлять обрыв тока в импульсно-периодическом режиме при амплитуде тока в единицы–сотни килоампер и формировать импульсы напряжения в десятки–сотни киловольт. Использование промышленных полупроводниковых диодов типа СДЛ, которые обладают в определенных режимах эффектом обрыва тока, протекающего в обратном направлении, и создание специальных полупроводниковых прерывателей тока (SOS) [8, 9] позволили существенно расширить возможности использования генераторов с индуктивным накопителем энергии (ИНЭ) [4, 5, 7, 8]. Так, например, в [7] сообщалось о создании нецепного НФ-лазера с энергией излучения 0,5 Дж при КПД 3 %. В [4, 5] приведены результаты исследований азотного лазера, накачиваемого от генератора с индуктивным накопителем и полупроводниковым прерывателем тока при использовании простейшей одноконтурной схемы.

В настоящей работе сообщается о создании генератора накачки с промежуточным индуктивным накопителем энергии, со специально разработанным полупроводниковым прерывателем тока [9] и коммутатором на основе насыщающегося магнитного ключа, который был использован для возбуждения азотного лазера с продольным разрядом в импульсно-периодическом режиме.

Электрическая схема генератора приведена на рис. 1. Накопительный конденсатор $C_1 = 2,8$ нФ заряжался от первичного тиратронного генератора через индуктивность $L_2 = 1,3$ мкГн и размыкающий диод D до напряжения $U_0 = -32$ кВ за время ~ 400 нс. В качестве размыкающего диода использовался специальный кремниевый диод типа SOS-100-2 [9] с максимальным обратным напряжением 100 кВ и максимальной амплитудой разрываемого тока 2 кА. Напряжение на C_1 перемагничивало магнитный ключ L_1 , который представлял собой нелинейный дроссель на сердечнике из пермаллового сплава 50НП с толщиной ленты 0,01 мм, сечением 6 см² и средним диаметром 10 см. Число витков обмотки равнялось 4.

К моменту окончания зарядки C_1 сердечник насыщался, магнитный ключ включался и конденсатор C_1 начинал разряжаться по цепи $C_1-L_1-D-L_2$, причем ток через диод имел обратную полярность. Время нарастания тока в данном контуре составляло ~ 80 нс. К моменту достижения максимума тока накопленный в диоде заряд рассасывался и ток прерывался за время $\sim 10 \div 20$ нс. За счет энергии в индуктивности ($L_1 + L_2$ насыщенная) на нагрузке R_n и диоде D возникал импульс напряжения, который мог заряжать обострительную емкость C_2 , установленную параллельно диоду, до ~ 80 кВ за время $20 \div 50$ нс в зависимости от величины C_2 . При напряжении на C_2 , равном ~ 50 кВ, в лазерной трубке зажигался разряд, ток которого являлся суммой тока индуктивного накопителя и обострительной емкости C_2 . Индуктивность подво-

дов L_3 делалась минимально возможной. В экспериментах использовалась кварцевая трубка длиной 20 см и внутренним диаметром 6 мм, заполненная азотом и подключенная с минимальной индуктивностью параллельно диоду. Внутренний резонатор, состоящий из плоского зеркала с алюминиевым покрытием и кварцевой пластинки, устанавливался на торцах трубки. Параллельно трубке, как отмечалось выше, в большинстве экспериментов подключался обострительный конденсатор C_2 , величина которого изменялась в пределах 10–940 пФ. Напряжение на трубке, токи через трубку и диод измерялись соответственно омическим делителем R_1 – R_2 , шунтами R_3 и R_4 , сигналы с которых направлялись на осциллограф С7–10Б. Форма импульса лазерного излучения и его энергия регистрировались фотодиодом ФЭК-22 СПУ и калориметром ИМО-2Н.

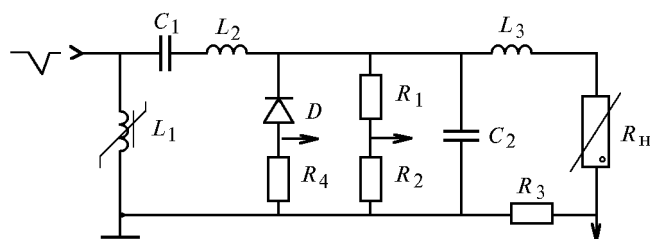


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: C_1 и C_2 – накопительная и обострительная емкости; L_1 – магнитный ключ; D – полупроводниковый прерыватель тока; L_2 и L_3 – индуктивности; R_n – сопротивление нагрузки; R_1 – R_4 – делитель напряжения и токовые шунты

На рис. 2 приведены осциллограммы тока через диод и напряжения на нагрузке в режиме холостого хода. Максимальный ток через диод в прямом направлении составлял 350 А. Амплитуда обратного тока перед его обрывом в диоде достигала 1 кА, время обрыва тока в диоде в оптимальных режимах не превышало 20 нс. В момент обрыва тока на нагрузке генерировался импульс напряжения с амплитудой до $U \approx 3U_0$ и длительностью примерно 40 нс. Фронт импульса напряжения обычно составлял 20 – 30 нс и мог уменьшаться при параллельной работе нескольких диодов до 10 нс. Генератор накачки при масляном охлаждении диода D и воздушном лазерной камеры работал с частотой повторения импульсов до 100 Гц.

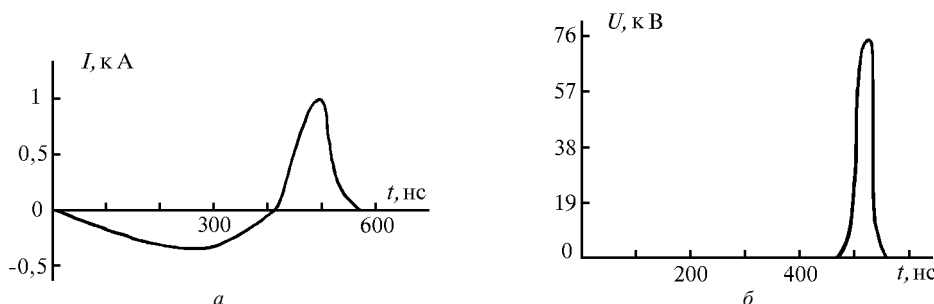


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока через полупроводниковый прерыватель (а) и напряжения на нагрузке в режиме холостого хода (б)

На рис. 3 приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда при работе генератора на газоразрядную трубку. Пробой газа наблюдался при напряжении около 50 кВ, а ток разряда достигал 80% тока индуктивного накопителя. Включение обострительного конденсатора несколько затягивало фронт импульса напряжения и увеличивало амплитуду разрядного тока и мощность лазерного излучения. Отметим, что из-за малой длительности фронта импульса напряжения на лазерной трубке в режимах без обострительного конденсатора пробой газа наблюдался при более высоких напряжениях и меньших давлениях, чем в режимах с обострительным конденсатором. Поэтому основные эксперименты были проведены с подключенным обострительным конденсатором C_2 , оптимальная величина которого составила 170 пФ. В этом случае ток разряда увеличился примерно в два раза, а мощность излучения на $\lambda = 337$ нм достигала 40 кВт при энергии за импульс 0,2 мДж. Давление азота в лазерной камере при максимальной мощности излучения равнялось 12 мм рт. ст. При дальнейшем увеличении C_2 энергия излучения падала и при $C_2 = 900$ пФ уменьшалась на порядок.

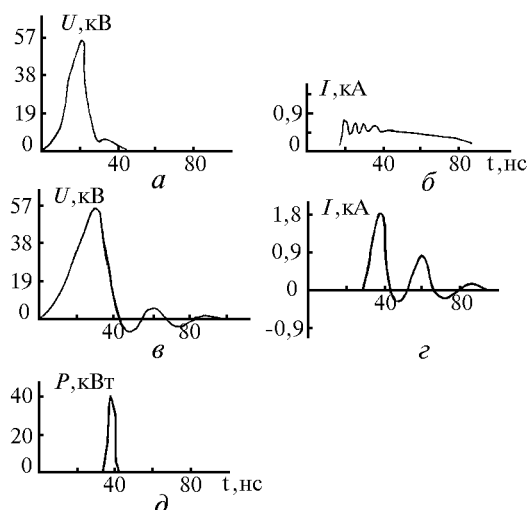


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на трубке (а, в), тока разряда (б, г) и лазерной генерации (д), полученные при работе генератора на газоразрядную трубку при $C_2 = 0$ (а, б) и $C_2 = 170$ пФ (в – д)

Следует отметить, что наличие и величина обострительного конденсатора влияют на потери энергии в прерывателе тока, которые определяют эффективность работы генератора с индуктивным накопителем энергии.

На рис. 4 приведены зависимости энергии, рассеиваемой в диоде во время обрыва тока при работе без нагрузки, от величины конденсатора C_2 . Видно, что потери энергии растут с увеличением напряжения на нагрузке и что при увеличении C_2 потери энергии снижаются, не превышая при $C_2 = 220$ пФ 25% энергии, запасенной в емкостном накопителе C_1 .

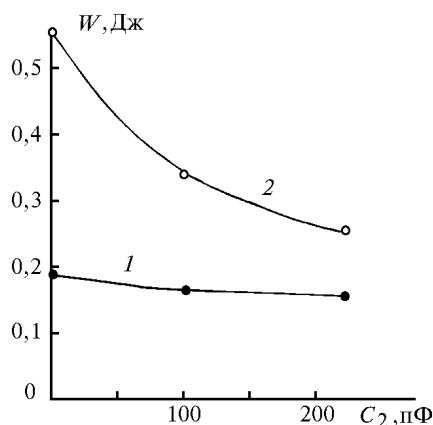


Рис. 4. Зависимости энергии, рассеиваемой в диоде за время обрыва тока в режиме холостого хода, от величины C_2 при достижении на нагрузке напряжения 50 (1) и 70 кВ (2)

Средняя мощность излучения измерялась при частотах повторения 10–100 Гц и достигала 12 мВт при частоте повторения 100 Гц. Максимальные энергии излучения в импульсе регистрировались при частотах повторения 20–50 Гц. Падение энергии излучения за импульс при $f > 50$ Гц связано с перегревом газа из-за сравнительно большого диаметра газоразрядной трубки. При использовании масла для охлаждения диода D и лазерной трубки меньшего диаметра с эффективным охлаждением можно значительно повысить частоту повторения импульсов азотного лазера и его среднюю мощность излучения.

В заключение отметим, что генераторы с индуктивным накоплением энергии позволяют осуществлять накачку однополярными импульсами с крутым передним фронтом и эффективно передавать энергию в нагрузку. На основании этого можно прогнозировать получение более высоких КПД и энергий излучения капиллярных лазеров, формирующих импульсы мягкого рентгеновского излучения [10], при их накачке от индуктивных накопителей энергии. Причем в настоя-

щее время в качестве прерывателей тока наиболее выгодно использовать полупроводниковые диоды (SOS) [4, 5, 8, 9] или плазменные прерыватели тока, подобные использованным в [2, 3, 5].

1. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Котов Ю.А., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. N 7. С. 1607–1608.
2. Месяц Г.А., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // ДАН СССР. 1989. Т. 307. N 4. С. 869–872.
3. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. N 1. С. 32–34.
4. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. N 2. С. 441–442.
5. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. С. 1606–1611.
6. Бочков В.Д., Верещагин Н.М., Горюнов Ф.Г. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 2. С. 231–238.
7. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. N 6. С. 511–512.
8. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н., Филатов А.Л. // ДАН. 1993. Т. 330. N 3. С. 315–317.
9. Mesyats G.A., Rukin S.N., Lyibutin S.K., et al. // Proc. of the 10th IEEE Pulse Power Conference. USA, 1995. P. 289–305.
10. Rossa J.J. // AIP Conference Proceedings. USA, 1994. V. 332. P. 359–361.

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
2 июня 1997 г.

E. Kh. Baksht, V. A. Vizir, A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko, V. V. Chervyakov.
Pulsed Lasers Pumped by Longitudinal Discharge Using Inductive Energy Storage.

Experimental investigation of a nitrogen laser pumped by longitudinal discharge using a generator with intermediate inductive energy storage, magnetic switch, and semiconducting opening switch is presented. It was shown that the use of peaking capacitors decreases energy losses in the opening switch and increases output laser energy by a factor of two. Pulse power of the laser radiation up to 40 kW and average one of 12 mW, respectively, were demonstrated. Pulse-repetitive regime of the laser operation at pulse repetition rate up to 100 Hz was demonstrated. It is assumed that the use of inductive energy storage provides a possibility to improve efficiency of capillary lasers generating pulses of soft X-radiation.