

ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.378.324

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ИЗ ИМПУЛЬСНОГО
ГЕНЕРАТОРА НАКАЧКИ В АКТИВНУЮ СРЕДУ
МАЛОГАБАРИТНОГО ТЕА-CO₂ ЛАЗЕРА****К. М. До**, аспирант РГРТУ; quangmanhars@gmail.com**Б. А. Козлов**, д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ; kozlov.qe.ryazan@mail.ru

Экспериментально определены условия наиболее полной передачи энергии из импульсного генератора накачки в активную среду малогабаритного отпаянного ТЕА-CO₂ лазера в широком диапазоне изменения соотношений между компонентами рабочих смесей. Установлено, что эффективность накачки достигает наибольших значений в рабочих смесях с повышенным содержанием молекулярных компонентов.

Цель работы – экспериментально установить основные взаимосвязи эффективности перевода энергии накачки из импульсного генератора в активную среду малогабаритного ТЕА-CO₂ лазера с химическим составом рабочей смеси и величиной напряжения импульса накачки, а также условия достижения максимальных значений эффективности накачки.

Ключевые слова: ТЕА-CO₂ лазер, импульсный генератор накачки, энергия накачки, энергия излучения в импульсе, эффективность перевода энергии из генератора накачки в активную среду лазера, CO₂-лазерная смесь.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-150-155

Введение

Вопросы эффективности передачи энергии, запасенной в емкостном накопителе импульсного генератора накачки, в активную среду малогабаритного ТЕА-CO₂ лазера помимо технической целесообразности имеют еще и очень важное значение с точки зрения обеспечения условий устойчивой и продолжительной работы самого лазера. Неполная передача энергии из импульсного генератора в активную среду лазера на стадиях пробоя и горения объемного разряда приводит к появлению на разрядном промежутке лазера и на самом коммутаторе импульсного генератора так называемых напряжений «рассогласования». Их появление может инициировать повторный пробой газоразрядного промежутка, в котором формируется активная среда, в форме только локального канала, а также вызывать обратный пробой коммутатора [1-3]. Оба эти явления приводят к прекращению работы лазера и выходу из строя газоразрядного коммутатора. Наиболее заметно эти явления проявляются на повышенных частотах повторения импульсов.

К настоящему времени вопросы эффективной передачи энергии из импульсного генератора накачки в активную среду импульсных ТЕА-лазеров изучены преимущественно для двух предельных случаев – только для стадии пробоя (применительно к активным средам на основе молекулярного азота) или для достаточно продолжительной по времени стационарной стадии горения объемного разряда накачки в ТЕА-CO₂ лазерах [4-6].

Стационарная стадия горения объемного разряда накачки в CO₂-лазерных смесях атмосферного и сверхатмосферного давлений характеризуется неизменным по времени напряжением горения с продолжительностью от десятков наносекунд до нескольких микросекунд [5]. Эффективность передачи энергии из генератора накачки в активную среду в достаточно больших газоразрядных промежутках достигает на этой стадии почти 100 %.

Условия накачки малогабаритных отпаянных ТЕА-CO₂ лазеров отличаются от «традиционных» очень короткой длительностью (40-50 наносекунд) и отсутствием характерного фикси-

рованного значения напряжения горения. Поэтому условия наиболее эффективной передачи энергии из генератора накачки в активную среду лазера требуют отдельного изучения.

Экспериментальная установка

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. В ее состав входят активный элемент лазера 1, источник накачки 2, система откачки и наполнения активного элемента рабочими газами 3, фотоприемники 4, делитель напряжения (Д), измерительный трансформатор тока накачки (ТТ) и широкополосный осциллограф 5.

Активный элемент ТЕА-СО₂ лазера представляет собой металлокерамическую конструкцию цилиндрической формы длиной 32 см и диаметром 8 см. Внутри нее расположены основные электроды для формирования объемного разряда накачки и вспомогательные электроды для зажигания вспомогательных искровых разрядов, обеспечивающих предварительную ионизацию газов в основном разрядном промежутке УФ-излучением. Активная среда возбуждалась в объеме $V_{AK} = 18 \times 0.8 \times 0.8 \text{ см}^3$. Юстировочные головки оптического резонатора располагались по торцам цилиндрического корпуса. Длина резонатора составляла 36 см. Сам резонатор был образован глухим металлическим зеркалом (золото на меди) с радиусом кривизны $R = 5 \text{ м}$ и плоской пластиной из селенида цинка с пропусканием $T = 25 \%$.

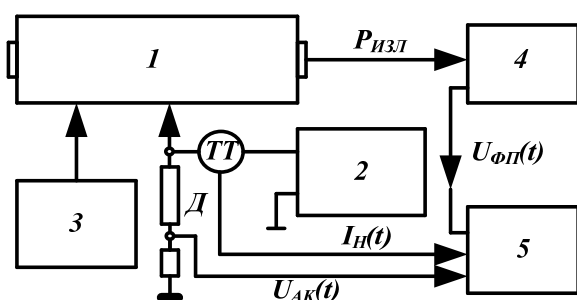


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки

В качестве импульсного генератора накачки применялся генератор с прямым разрядом накопительной емкости на разрядный промежуток через сильноточный коммутатор. Величина накопительной емкости импульсного генератора накачки составляла 10 нФ. В качестве коммутатора применялся псевдоискровой разрядник типа ТПИ-25-10к, который обеспечивал пропускание токов до 10 кА при длительностях от единиц до десятков и сотен наносекунд. Амплитуда высоковольтных импульсов, формируемых импульсным генератором накачки на межэлектродном

промежутке лазера, могла изменяться в пределах от 5 кВ до 34 кВ.

Временное поведение импульсов напряжения на основном разрядном промежутке и тока накачки изучалось с помощью резистивного делителя напряжения (Д) и широкополосного трансформатора тока (ТТ) на осциллографе С1-75 5. Делитель и трансформатор были выполнены в соответствии с рекомендациями, изложенными в [8, 9]. Параметры импульсов излучения лазера регистрировались с помощью фотоприемников 4 (измеритель средней мощности лазерного излучения ИМО-2Н и скоростной фотоприемник ФП-1). Откачка и наполнение активного элемента осуществлялись с помощью вакуумной системы 3. В ее состав входили форвакуумный насос 2НВР-5DM, обеспечивавший откачку активного элемента до остаточного давления $P \leq 10^{-2}$ Торр, и распределительная система, обеспечивавшая подачу рабочих газов (СО₂, N₂, He, ...) с необходимыми парциальными давлениями в активный элемент. Полное давление смеси газов в активном элементе составляло 1 атмосферу.

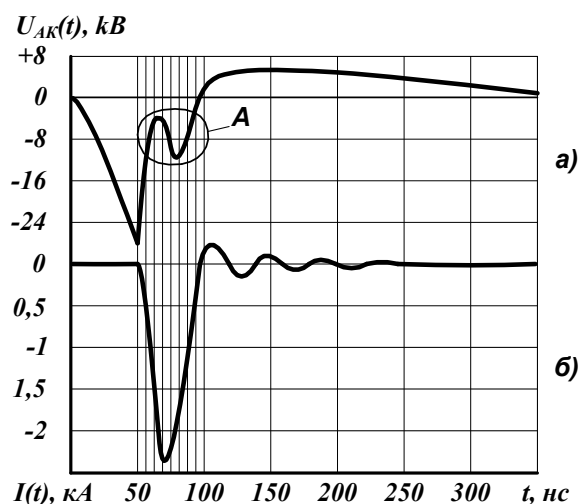


Рисунок 2 – Типичные осциллограммы импульсов напряжения $U_{AK}(t)$ на разрядном промежутке лазера (а) и тока разряда $I(t)$ (б) для напряжения заряда накопительного конденсатора генератора накачки $U_0 = 20 \text{ кВ}$

Значения энергии, которая переводилась из генератора накачки в плазму разряда на стадиях пробоя и горения, определялись путем графического интегрирования по осциллограммам напряжения и тока по времени. Автономно эта же величина определялась по разности двух значений энергии – запасенной в емкостном накопителе до момента пробоя и оставшейся в нем в момент «погасания» разряда. В последнем случае осциллографировалось только временное поведение напряжения на промежутке и определялись значения напряжения пробоя и напряже-

ния «погасания» разряда. Величина энергии, запасенной в накопительном конденсаторе, определялась по формуле:

$$W_H = C_H \frac{U_0^2}{2}, \quad (1)$$

где C_H – емкость накопительного конденсатора; U_0 – напряжение его заряда.

Эффективность передачи энергии накачки W_H в плазму объемного разряда определялась по соотношению:

$$\eta = \frac{W_{OP}}{W_H}, \quad (2)$$

где W_{OP} – энергия, рассеянная в плазме объемного разряда.

Энергия, рассеиваемая в плазме объемного разряда, определяется как:

$$W_{OP} = \int_0^{\tau} U(t) * J(t) * dt, \quad (3)$$

где $U(t)$ и $J(t)$ – временное поведение напряжения на разрядном промежутке и тока объемного разряда.

За начало отсчета здесь принимается момент начала пробоя. Верхний предел интегрирования τ должен в несколько раз превышать продолжительности тока объемного разряда. При графическом интегрировании верхний предел τ принимался равным длительности тока объемного разряда по основанию.

Погрешности измерений напряжений и токов осциллографических методов не превышали 10 %. Погрешности измерений энергий излучения не превышали 5 %. Погрешности определения энергии, запасаемой в накопительном конденсаторе, определяются погрешностями значений номиналов емкостей и напряжений заряда и не превышают 10 %.

Результаты измерений

Типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда (тока накачки) приведены на рисунке 2 для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$ при напряжении заряда накопительного конденсатора $U_0 = 20$ кВ. Напряжение на разрядном промежутке $U_{AK}(t)$ нарастает до пробойного значения в 24 кВ за время $t_{\text{ФР}} \approx 50$ наносекунд. После пробоя происходит быстрый спад напряжения до значения в 5 кВ с последующим подъемом до 10 кВ и спадом до нулевого значения. После текущего времени $t = 100$ нс на разрядном промежутке лазера напряжение изменяет свою полярность, достигает в максимуме значения в ≈ 5 кВ и в течение почти 500 нс спадает до нулевого значения.

Характерного для больших разрядных промежутков ($d_{AK} \geq 2 \div 5$ см) «плато», отражающего стационарную стадию горения объемного разряда, ни на одной из осциллограмм напряжения на разрядном промежутке не наблюдалось. Вместо неизменного во времени напряжения горения всегда имело место характерное изменение напряжения во времени, заключенное в кружок и отмеченное буквой «А» на осциллограмме напряжения на рисунке 2.

На рисунке 3 приведены зависимости напряжений пробоя газоразрядного промежутка лазера от напряжения, до которого заряжается емкостный накопитель импульсного генератора накачки для наиболее часто применяемых газовых составов рабочих CO_2 -лазерных смесей и для чистого гелия.

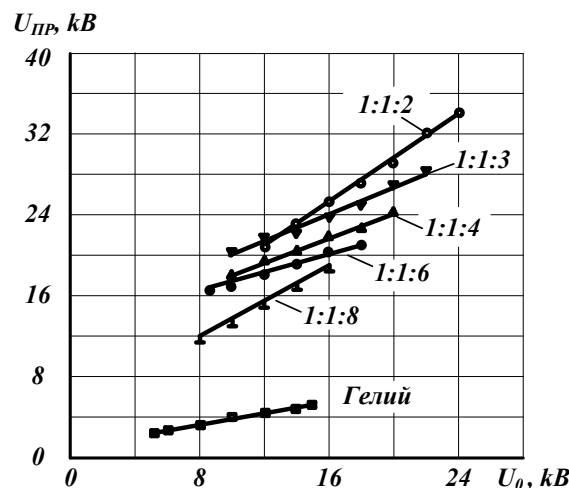


Рисунок 3 – Зависимости напряжений пробоя разрядного промежутка лазера от напряжения заряда накопительного конденсатора генератора накачки для различных компонентных составов $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ и чистого гелия. Рабочее давление для всех газовых составов – 1 атмосфера

Из приведенных зависимостей видно, что напряжения пробоя зависят как от напряжения заряда накопительного конденсатора импульсного генератора, так и от компонентного состава рабочих смесей.

Для каждой зависимости характерны свои минимальные и максимальные значения напряжения пробоя. Минимальные напряжения пробоя соответствуют формированию условий «перекрытия» электронных лавин в промежутке и последующему воспроизводству и размножению зарядов в промежутке, обеспечивающем равномерное протекание тока по всему промежутку [6]. Максимальные значения напряжений пробоя соответствуют перерождению объемного разряда в искровой канал, не пригодный для накачки.

Напряжения пробоя увеличиваются с увеличением содержания в рабочей смеси двуокиси углерода и молекулярного азота и достигают своих характерных значений $U_{МИН} = 23$ кВ и $U_{МАКС} = 32.5$ кВ при наполнении активного элемента рабочей смесью газов в соотношении $CO_2:N_2:He = 1:1:2$. Минимальные значения напряжений пробоя характерны для чистого гелия. Они находятся в пределах от 3 до 5 кВ.

Зависимости напряжений пробоя от относительной концентрации молекул двуокиси углерода и молекулярного азота в CO_2 -лазерных смесях приведены на рисунке 4.

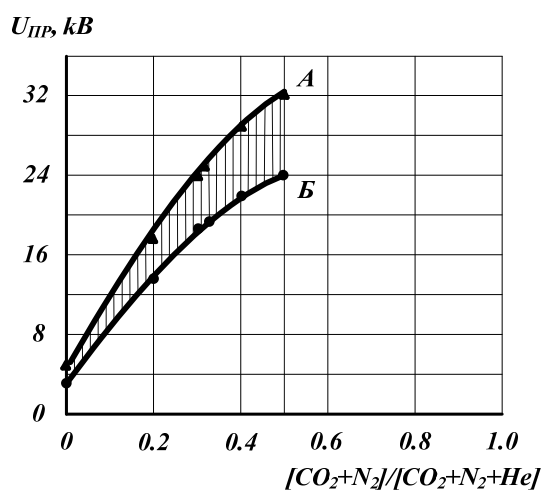


Рисунок 4 – Зависимости максимальных (А) и минимальных (Б) значений напряжений пробоя газоразрядного промежутка лазера от относительной концентрации молекулярных компонентов $[CO_2 + N_2]$ в рабочей смеси

Из рисунка видно, что область горения объемного разряда заключена между двумя кривыми А и Б. В пределах этой области объемный разряд обладает пространственной однородностью и воспроизводимостью и обеспечивает эффективное возбуждение активной среды лазера и генерацию импульсов лазерного излучения со стабильными параметрами.

Ниже кривой (Б) располагается область, при которой объемный разряд не формируется (пробой газоразрядного промежутка или отсутствует, или наблюдается искровой пробой), а при напряжениях, превышающих значения над кривой (А), формируются только отдельные локальные искровые каналы, не пригодные для накачки ТЕА- CO_2 лазера.

Зависимости энергии, вводимой в плазму объемного разряда, от запасенной в накопительном конденсаторе генератора накачки, приведены на рисунке 5 для различных газовых смесей $CO_2:N_2:He$ и чистого гелия.

Энергия, передаваемая из генератора накачки

в плазму объемного разряда, зависит от величины энергии, запасенной в накопителе генератора, и задается компонентным составом рабочей смеси.

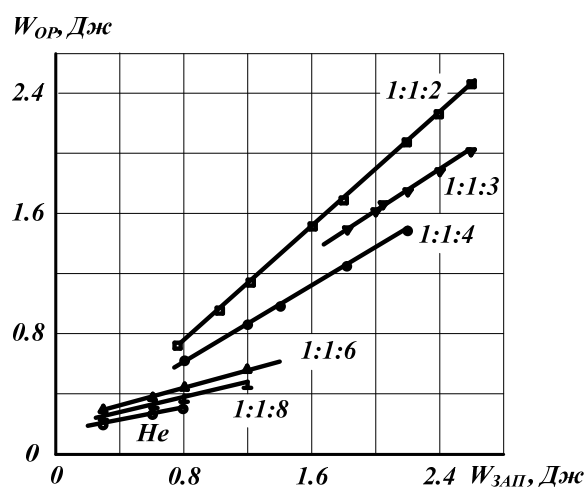


Рисунок 5 – Зависимости энергии, вводимой в плазму объемного разряда накачки, от энергии, запасенной в накопительном конденсаторе импульсного генератора. Соотношения между компонентами рабочей смеси $CO_2:N_2:He = 1:1:2 \div 1:1:8$

Энергия, вводимая в плазму объемного разряда $W_{ОР}$, увеличивается с увеличением запасаемой энергии в накопителе генератора и с увеличением доли молекулярных компонентов в рабочей смеси $CO_2:N_2:He$. Наибольшие значения энергии накачки, введенной в плазму объемного разряда, характерны для смеси $CO_2:N_2:He = 1:1:2$. Для нее энергия накачки увеличивается от $W_{МИН} = 0.76$ Дж до $W_{МАКС} = 2.44$ Дж при увеличении запасаемой энергии в генераторе накачки от $W_{МИН}^* = 0.79$ Дж до $W_{МАКС}^* = 2.6$ Дж.

Наименьшее значение энергии, вводимой в плазму объемного разряда, характерно для чистого гелия. Минимальное и максимальное значения энергий для чистого гелия составляют соответственно 0.18 Дж и 0.3 Дж.

Зависимости эффективности передачи энергии из импульсного генератора накачки с прямым разрядом накопительного конденсатора в плазму объемного разряда малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера для различных газовых смесей приведены на рисунке 6. Видно, что для всех исследованных смесей имеет место одна тенденция – снижение эффективности накачки при увеличении энергии, запасаемой в емкостном накопителе импульсного генератора.

Максимальные значения эффективности передачи энергии в CO_2 – лазерные смеси находятся в пределах от 95 % (смесь $CO_2:N_2:He = 1:1:2$) до 85 % (смесь $CO_2:N_2:He = 1:1:8$).

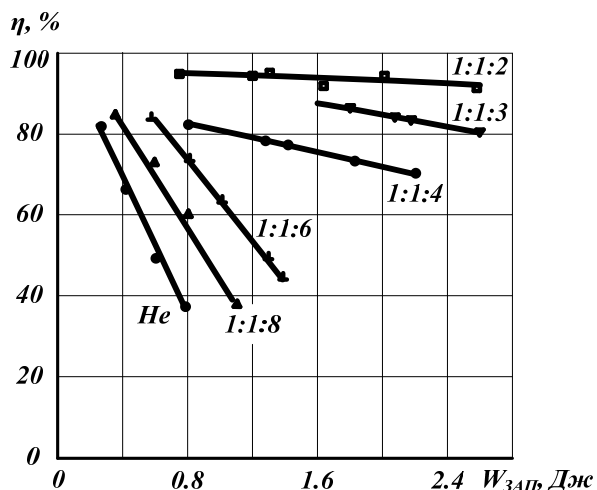


Рисунок 6 – Зависимости эффективностей передачи энергии из генератора накачки в плазму объемного разряда для различных газовых смесей

Максимальная эффективность передачи энергии в плазму объемного разряда в чистом гелии имеет значение $\eta = 80\%$, однако абсолютные значения передаваемой энергии при этом составляют всего лишь $0.18 \div 0.3$ Дж. Минимальные значения эффективности накачки, характерные для повышенных значений энергии и плотности накачки, находятся в пределах от 93% ($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:2$) до 63% ($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$). Для чистого гелия – $\eta_{\text{мин}} = 37\%$.

Заключение

Основные результаты данной работы по изучению условий ввода энергии накачки в плазму объемного разряда малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера показали следующее:

1. Эффективность передачи энергии из генератора накачки в плазму объемного разряда опре-

деляется химическим составом рабочих смесей и величиной запасенной в генераторе энергии.

2. Максимальные значения эффективности передачи энергии в плазму объемного разряда наблюдаются при минимальных значениях энергии, запасаемой в генераторе, накачки и они имеют значения $\eta = 85 - 95\%$.

3. Эффективность накачки уменьшается при увеличении энергии, запасаемой в генераторе накачки и увеличении доли гелия в рабочих смесях. Минимальные значения эффективности накачки находятся в пределах $\eta_{\text{мин}} = 63\%$ ($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$) \div 93% ($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:2$).

Библиографический список

1. Козлов Б. А. Малогабаритные отпаянные ТЕА – лазеры с высокой средней мощностью излучения // Вестник РГПТУ. 2001. № 53. С. 139-143.
2. Gorkin S. B., Kozlov B. A., Solovyov V. I. Sealed-off TEA- CO_2 lasers with pulse repetition rate up to 5 kHz for technological applications // Proceedings of SPIE. 1994. Vol. 330. Pp. 137-150.
3. Козлов Б. А., Степанов В. А. О рассогласовании импульсного генератора с активной средой на параметры ТЕА-лазера на CO_2 // Электронная техника. Серия 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1984. № 5. С. 79-83.
4. Месяц Г. А., Осипов В. В., Тарасенко В. Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 272 с.
5. Газовые лазеры / под ред. И. Мак-Даниэля, У. Нигэна. М.: Мир, 1986. 552 с.
6. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991, 224с.
7. Карнюшин В. Н., Солоухин Р. Н. Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атомиздат, 1981. 200 с.
8. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М.: Энергоатомиздат, 1986. 324 с.
9. Anderson J. M. Wide Frequency Range Current Transformers // Rev. Sci. Instrum. 1971. No. 7. Pp. 915-926.

UDC 621.378.324

THE EFFICIENCY OF ENERGY TRANSFER FROM PULSE PUMPING GENERATOR TO ACTIVE MEDIUM OF SMALL-SIZED TEA- CO_2 LASER

Do Quang Manh, post-graduate student, RSREU, Ryazan; quangmanhars@gmail.com

B. A. Kozlov, PhD, Dr. in physic-mathematical sciences, full professor of Electronic Devices Dept, RSREU; kozlov.qe.ryazan@mail.ru

The conditions for the most complete transfer of energy from pulsed pumping generator to the active medium of small-sized sealed-off TEA- CO_2 laser are experimentally determined in a wide range of changes in the ratios between the components of working mixtures. It is established that the pumping efficiency reaches its highest values in working mixtures with increased content of molecular components.

The main aim of this work is to establish experimentally the basic interrelationships between the efficiency of pump energy transfer from pulsed generator to the active medium of small-sized TEA-CO₂ laser with chemical composition of working mixture and the value of pump pulse voltage, as well as to determine the conditions for achieving maximum values of transmission efficiency.

Key words: TEA-CO₂ laser, pulse pump generator, pump energy, pulse radiation energy, efficiency of pump energy transfer from pulsed generator to laser active medium, CO₂-laser mixture.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-150-155

1. **Kozlov B. A.** Malogabarinye otpayannye TEA-lasezu s vucokoi chetnei mosnoct'iu izluchenia. Vetsnik RGRTU. 2001. № 53. pp. 139-143. (in Russian).

2. **Gorkin S. B., Kozlov B. A., Solovyov V. I.** Sealed-off TEA-CO₂ lasers with pulse repetition rate up to 5 kHz for technological applications. Proceedings of SPIE. 1994, Vol. 330. pp. 137-150 (in Russian).

3. **Kozlov B. A., Stepanov V. A.** O rassoglasovaniya impul'snovo generator s aktivnoi sredoi na parametru TEA-lasera na CO₂. Electronnaia tekhnika. Series 11. Lasernaia tekhnika i optoelectronika. 1984. no. 5. pp. 79-83. (in Russian).

4. **Mesyaza G. A., Ocipov V. V., Taracenko V. F.**

Impul'snye gazovue lasezu. M.: Nauka, 1991. 272 p. (in Russian).

5. **I. Mak-Danielia, U. Nigena.** Gazovue laseru. – M.: Mir, 1986, 552 p (in Russian).

6. **Korolev Iu. D., Mecsyzha G. A.** Physika impul'snovo proboya gazov. M.: Nauka, 1991, 224 p (in Russian).

7. **Karnushin V. N., Soloukhin R. I.** Macroscopic molekulyarnye prossesy v gazovyyk lazerak. Moscow: Atomizdat. 1981. 200 p (in Russian).

8. **Svab A.** Izvereniya na vuisokom napriazheny. M.: Energoatomizdat, 1986, 324 p (in Russian).

9. **Anderson J. M.** Wide Frequency Range Current Transformers. Rev. Sci. Instrum. 1971. no. 7. pp. 915-926.