

УДК 537.523

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ С ПОМОЩЬЮ ФОТОСИГНАЛА КАЛИБРОВАННОГО ФОТОПРИЁМНОГО УСТРОЙСТВА

А. Н. Власов, д.т.н., профессор кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-6298-0433, e-mail: oief@rsreu.ru

А. В. Николаев, старший преподаватель кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-7603-7094, e-mail: oief@rsreu.ru

Д. В. Левик, аспирант РГРТУ, каф. ОиЭФ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0004-0236-7727, e-mail: oief@rsreu.ru

Е. И. Чернов, д.т.н., профессор кафедры ИИБМТ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0001-5088-775X, e-mail: instpi@yandex.ru

Создано фотоприёмное устройство и проведена его калибровка для оценки с помощью фотосигнала температуры плазмы импульсного плазмотрона с полукрытой разрядной камерой с электрически взрывающимися медными проводниками большого сечения. Фотоприёмное устройство установлено в электрофизической установке ИНГИР-Мнга-15 и направлено на взрывную камеру импульсного плазмотрона.

Цель работы заключается в расчёте параметров фотоприёмного устройства и в экспериментальной оценке температуры плазмы в импульсном плазмотроне с помощью созданного устройства.

Ключевые слова: импульсный плазмотрон, электрический взрыв медных проводников большого сечения, фотоприёмное устройство.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-238-243

Введение

Импульсные плазмотроны с полукрытой разрядной камерой используются для создания в воздухе тороидальных плазменных вихрей с высокой светимостью [1]. Это представляет интерес для создания импульсных источников мощного оптического излучения, плазмохимии, а также для получения автономных плазменных образований (АПО), удаленных как от стенок разрядной камеры, так и от источников энергии, что позволяет моделировать грозовые явления [2].

В импульсном плазмотроне [3] тороидальный плазменный вихрь создавался с помощью электрического взрыва тонких медных проволок, установленных на боковой стенке полукрытой цилиндрической камеры, и затем он усиливался с помощью электрически взрывающихся толстых медных проводников, создававших мощный импульс тороидального магнитного поля. Этот импульс способен инициировать индукционный разряд внутри тороидального плазменного вихря, что способствует формированию долгоживущих АПО. При этом экспериментально удалось получить АПО с временем жизни порядка 50 мс. Для получения достаточно большего времени жизни плазменных сгустков необходимо обеспечить формирование токового слоя при индукционном разряде. Проведенные численные расчёты показали, что для получения узкой области распределения тока (в пределе токового слоя) критически важным параметром плазмы является начальная температура плазменного сгустка [4]. Поэтому экспериментальные данные о температуре плазменного сгустка при формировании АПО являются важной информацией, необходимой для совершенствования систем ввода энергии в плазму. **Цель работы** – расчёт параметров фотоприёмного устройства и проведение экспериментальных исследований по оценке максимальной температуры плазмы в макетном образце импульсного плазмотрона.

Следует отметить, что использование стандартных пирометров [5] для достижения обозначенной цели не представлялось возможным из-за имеющихся особенностей, в частности:

1) диапазон измеряемых температур в стандартных пирометрах ограничен 6000 К, в то время как в рассматриваемом случае температура плазмы может достигать значений порядка 20000 К;

2) измеряемый параметр (температура плазмы) представляет собой короткий импульс длительностью до 200 мкс, что затруднительно обеспечить в стандартных пирометрах;

3) необходимость синхронизации импульсного фотосигнала с импульсом накачки энергии в плазму импульсного плазмотрона, что не предусмотрено в стандартных пирометрах.

Поэтому создание рассматриваемого далее фотоприёмного устройства являлось актуальной задачей.

Теоретическая часть

Плотную плазму, образующуюся в момент электрического взрыва медных проводников, можно в первом приближении считать чёрным телом, поскольку она состоит в основном из окислов меди, обладающих близким к единице коэффициентом излучения. В этом случае можно использовать закон Стефана – Больцмана

$$\varepsilon_T = \sigma T^4, \quad (1)$$

где ε_T – интегральная излучательная способность плазменного сгустка, Вт/м²; σ – универсальная постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T – температура, К.

В качестве рабочей модели будем рассматривать образующийся при электровзрыве плазменный сгусток в виде шара с диаметром, равным диаметру взрывной камеры D . В этом случае плотность потока мощности излучения на расстоянии X , где установлено фотоприёмное устройство, составит

$$\varepsilon_p = \varepsilon_T (D/2)^2 / X^2. \quad (2)$$

Мощность излучения, поступающего на площадку фотодиода, в этом случае равна

$$P = \varepsilon_p \pi (d/2)^2 / N, \quad (3)$$

где d – диаметр диафрагмы, м; N – кратность ослабления излучения нейтральным фильтром, имеющем спектральную характеристику в виде некоторой константы.

Сигнал на выходе фотоприёмного устройства составит

$$U = KP, \quad (4)$$

где K – коэффициент передачи фотоприёмного устройства, В/Вт.

После последовательных подстановок формул (1) в (2), (2) в (3), и (3) в (4), получаем

$$T = \sqrt[4]{\frac{16X^2NU}{\pi\sigma KD^2d^2}}. \quad (5)$$

Формулу (5) для практического использования удобно записать в виде

$$T = A\sqrt[4]{U}, \quad (6)$$

где U – напряжение на выходе фотоприёмного устройства, В; A – размерный коэффициент, К/В^{1/4}.

$$A = \sqrt[4]{\frac{16X^2N}{\pi\sigma KD^2d^2}}. \quad (7)$$

Конструкция и электрическая схема фотоприёмного устройства

Нами использовалась одна из стандартных электрических схем фотоприёмных устройств [6], доработанная с учетом специфических особенностей конкретного использования, а именно:

1) с учётом одиночного субмиллисекундного импульса излучения, имеющего мощность на уровне сотен киловатт;

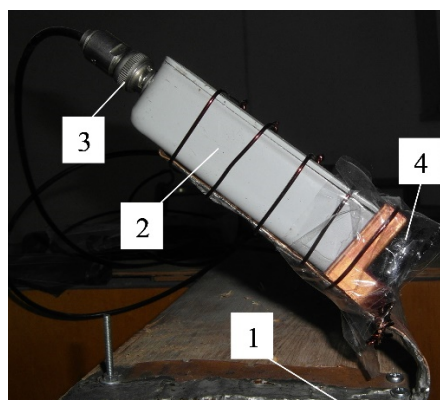
2) с учётом необходимости синхронизации фотосигнала с импульсом накачки энергии в импульсном плазмотроне.

Внешний вид и электрическая схема фотоприёмного устройства приведены на рисунке 1.

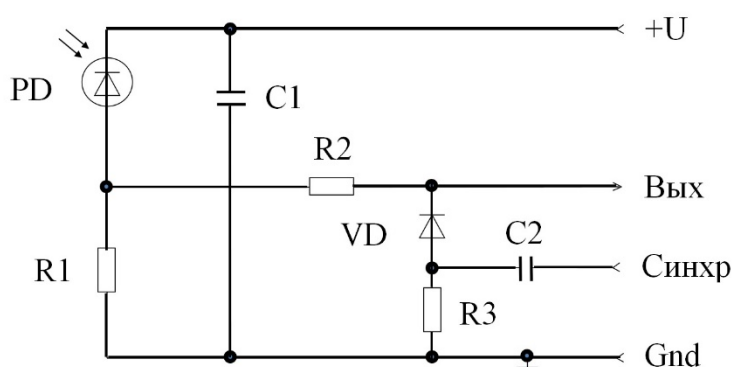
Фотоприёмное устройство (рисунок 1, а) установлено на металлическом кронштейне 1 и направлено на взрывную камеру импульсного плазмотрона, конструктивно фотоприёмное устройство выполнено в виде металлической коробки 2 с соответствующими разъёмами 3, при этом перед фотоприёмной площадкой фотодиода ФДУК-1 установлены диафрагма диаметром 3 мм и четыре нейтральных фильтра 4 с десятикратным ослаблением каждый. На электрической схеме (рисунок 1, б) приняты следующие обозначения: PD – фотодиод ФДУК-1, VD – кремневый диод КД-221, C1 – сглаживающий конденсатор 1 мкФ, C2 – разделительный конденсатор 1 нФ, R1 – сопротивление 390 Ом, R2 – сопротивление 1 кОм, R3 – сопротивление 1 кОм, «U» – источник питания 9 В, «Вых» – выходной сигнал, «Синхр» – синхронизирующий сигнал, «GND» – общий провод.

Фотоприёмное устройство работает следующим образом.

На вход «Синхр» (рисунок 1, б) от пульта управления подаётся синхронизирующий сигнал в виде прямоугольного импульса, который через дифференцирующую цепочку C2, R3 и через сумматор VD, R2 подаётся через выход «Вых» на цифровой осциллограф, работающий в режиме одиночного импульса. К этому сигналу затем добавляется сигнал, получаемый на резисторе R1 при протекании фототока фотодиода PD.



а (a)



б (b)

Рисунок 1 – Фотоприёмное устройство: а – внешний вид, б – электрическая схема

Figure 1 – Photodetector: a – external appearance, b – electrical circuit

Калибровка фотоприёмного устройства

Калибровка фотоприёмного устройства представляла проблему в том смысле, что трудно было найти источник образцового излучения, имеющего спектр, аналогичный спектру излучения плотной плазмы с температурой порядка 20000 К. Поэтому для калибровки фотоприёмного устройства использовалась лазерная указка, работающая в зелёном диапазоне световых волн, имеющая мощность $P_L = 25$ мВт. Несмотря на то, что лазер имеет узкую спектральную линию, можно сказать обладает «дельтаобразным» спектром излучения, применение лазерного излучения оправдано тем, что фотодиод ФДУК-1 работает в режиме, далёком от насыщения, и с точки зрения выходного сигнала обладает интегрирующими свойствами по спектру регистрируемого излучения. Для него неважно, этот спектр является широким, или представляет собой дельта-функцию Дирака. Фотодиод в ненасыщенном режиме реагирует на интегральную мощность излучения. Конечно, погрешность, связанная с собственной спектральной характеристикой, имеет место быть, но в нашем случае фотоприёмное устрой-

ство не является средством измерения, требующим соответствующей аттестации, это устройство служит индикатором, и его показания носят ориентировочный характер.

Калибровка фотоприёмного устройства осуществлялась следующим образом.

При подаче этого излучения на площадку фотодиода ФДУК-1 (без фильтров) на выходе «Вых» было зарегистрировано напряжение $U_L = 5$ В. Таким образом, коэффициент передачи фотоприёмного устройства составляет:

$$K = \frac{U_L}{P_L} = \frac{5}{25 \cdot 10^{-3}} = 200, \text{ В/Вт.} \quad (8)$$

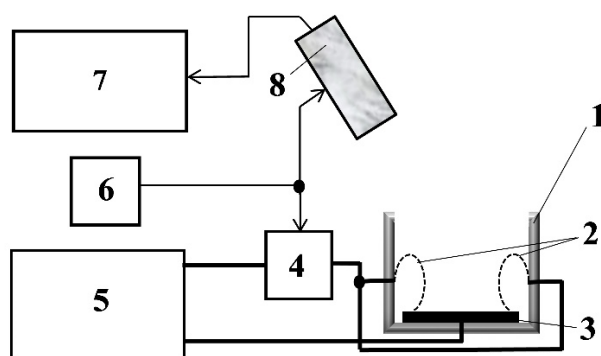
Остальные параметры в формуле (7) имеют следующие значения: $X = 1,7$ м; $D = 0,088$ м; $d = 0,003$ м; $N = 10000$. Подставляя эти параметры в формулу (7) получаем:

$$A = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot (1,7)^2 \cdot 10000}{\pi \cdot (5,57 \cdot 10^{-8}) \cdot 200 \cdot (0,088)^2 \cdot (0,003)^2}} = 2 \cdot 10^4, \text{ К/В}^{1/4}. \quad (9)$$

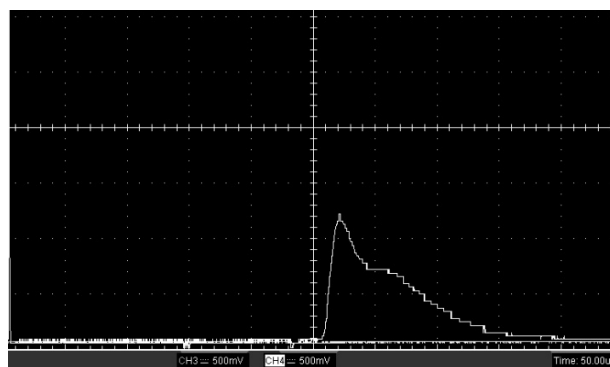
Отметим ещё раз, в экспериментах использовались нейтральные фильтры, одинаково ослабляющие излучение независимо от его спектрального состава.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проверки корректности проведенных расчётов были проведены испытания фотоприёмного устройства совместно с импульсным плазмотроном [3], помещённым в электрофизическую установку ИНГИР-Мега-15 [7]. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2, а.



а (a)



б (b)

Рисунок 2 – Экспериментальная установка: а – блок-схема, б – осциллограмма фотосигнала

Figure 2 – Experimental setup: a – block diagram, b – oscillogram of photo signal

Экспериментальная установка (рисунок 2, а) содержит следующие составные части: 1 – полукрытая цилиндрическая камера, 2 – электрически взрывающиеся медные проводники (16 шт. сечением $0,35 \text{ мм}^2$ каждый), 3 – общий электрод, 4 – тиристорный коммутатор (коммутируемый ток до 400 кА), 5 – конденсаторная батарея (1 Ф, 400 В), 6 – пульт управления, 7 – цифровой осциллограф, 8 – фотоприёмное устройство. Блоки 1, 2, 3 входят в состав импульсного плазмотрона [3], а блоки 4, 5, 6, 7 входят в состав электрофизической установки «ИНГИР-Мега-15» [7]. Фотоприёмное устройство 8 было направлено на открытую часть цилиндрической камеры 1.

Эксперимент проводился следующим образом.

От пульта управления 6 подавался синхронизирующий сигнал в виде прямоугольного импульса на синхронизирующий вход фотоприёмного устройства 8 и на тиристорный коммутатор 4, в результате чего запускаясь развёртка осциллографа, и срабатывал тиристорный коммутатор 4, передавая через общий электрод 3 напряжение от конденсаторной батареи 5

на взрывающиеся медные проводники 2. Вспышка света в фотоприёмном устройстве 8 преобразовывалась в фотосигнал, осциллограмма которого приведена на рисунке 2, б. Длительность импульса составила около 150 мкс, амплитуда напряжения – $U = 1,2$ В. В этом случае в соответствии с формулой (6) с учётом (9) получаем

$$T = A\sqrt[4]{U} = 2 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[4]{1,2} = 2,09 \cdot 10^4, \text{ К.} \quad (10)$$

Полученный результат (10) лежит в диапазоне температур, типичных для явления электро-взрыва металла [8].

Заметим, что измеренная температура представляет собой среднее значение по всей поверхности плазменного сгустка. В качестве информативного параметра использовалось максимальное значение температуры плазменного сгустка, которому соответствовало максимальное значение напряжения на осциллограмме. Этой информации достаточно для оценки эффективности работы источников накачки энергии в импульсном плазмотроне.

Заключение

В настоящей работе была поставлена и решена задача проведения расчётов параметров фотоприёмного устройства для оценки температуры плазмы в импульсном плазмотроне. Также проведена экспериментальная проверка работоспособности созданного экспериментального образца фотоприёмного устройства. Его использование в дальнейшем планируется для оценки эффективности различных способов ввода энергии в плазму импульсного плазмотрона при усовершенствовании его конструкции. Совершенствование импульсного плазмотрона необходимо для повышения эффективности плазмохимических реакций при действии сильного импульсного магнитного поля, увеличения яркости генерируемого светового излучения, а также для повышения времени жизни получаемых автономных плазменных образований.

Использованная в данной работе электрофизическая установка «ИНГИР-Мега-15» [7] была создана при поддержке Министерства науки и высшего Образования РФ, государственный контракт № 14.518.11.7002 от 19 июля 2012 г.

Библиографический список

1. Буланов С.С., Есиев Р.У., Камруков А.С., Козлов Н.П., Морозов М.И., Росляков И.А. Взрывные плазменно-вихревые источники оптического излучения // Журнал технической физики. 2010. Том 80. Вып. 11. С. 87-94.
2. Фуров Л.В. Получение автономных долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 3. С. 98-101.
3. Власов А.Н., Дубков М.В., Черкасова Ю.В., Николаев А.В. Создание и исследование импульсного плазмотрона с индукционным разрядом для получения автономных плазменных образований // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 153-161.
4. Власов А.Н., Николаев А.В. Численное исследование плотности тока в индукционном разряде импульсного плазмотрона // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. С. 129-135.
5. Бодров М.В. Теплотехнические измерения и приборы: учеб. пособие / М.В. Бодров, В.Ю. Кузин; Нижегород. гос. архитектурн. - строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ. 2015. 176 с.
6. Чернов Е.И. Фотоприёмные устройства на основе фотодиодов и их применение // Обзоры по электронной технике. Серия 4, Электровакуумные и газоразрядные приборы. Выпуск 1 (1164). М.: ЦНИИ «Электроника», 1986. – 43 с.
7. Власов А.Н., Дубков М.В., Буробин М.А., Николаев А.В. и др. (всего 10 человек). Проведение исследований индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля в горячей плазме с использованием установки типа «ИНГИР-Мега», имеющей индуктивный накопитель для генерирования индукционного разряда при накачке мегаваттными импульсами // Отчет о НИР (заключ.): 28-12 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; рук. Власов А.Н. Рязань. 2013. № ГР 01201272674. Инв. № 02201450296.
8. Мартынюк М.М. Фазовые переходы при импульсном нагреве. Монография. М., Изд-во РУДН, 1999. 332 с.

UDC 537.523

ESTIMATION OF PLASMA TEMPERATURE IN PULSED PLASMATRON USING PHOTOSIGNAL FROM CALIBRATED PHOTODETECTOR

A. N. Vlasov, Dr. in technical sciences, full professor, department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-6298-0433, e-mail: oief@rsreu.ru

A. V. Nikolaev, lecturer, department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-7603-7094, e-mail: oief@rsreu.ru

D. V. Levik, postgraduate student, Ryazan State Radio Engineering University, department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0004-0236-7727, e-mail: oief@rsreu.ru

E. I. Chernov, Doctor in technical Sciences, Professor, Department of information and biomedical equipment, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0001-5088-775X, e-mail: instpi@yandex.ru

A photodetector has been created and calibrated, it allowing the usage of a photo signal to estimate plasma temperature of pulse plasmatron with semi-open discharge chamber with electrically exploding copper conductors of large cross-section. The photodetector is installed in INGIR-Mnga-15 electrophysical installation and is directed at explosion chamber of pulse plasmatron. The aim of the work is to calculate photodetector parameters in experimental verification of calculations results.

Keywords: pulsed plasma torch, electrical explosion of large cross-section copper conductors, photodetector.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-238-243

References

1. **Bulanov S.S., Esiev R.U., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Morozov M.I., Roslyakov I.A.** Vzryvnye plazmenno-vihrevye istochniki opticheskogo izlucheniya. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2010, vol. 80, issue 11, pp. 87-94. (in Russian).
2. **Furov L.V.** Poluchenie avtonomnyh dolgozhivushchih plazmennyyh obrazovaniy v svobodnoy atmosfere. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2005, vol. 75, issue 3, pp. 98-101. (in Russian).
3. **Vlasov A.N., Dubkov M.V., Cherkasova Yu.V., Nikolaev A.V.** Sozдание i issledovanie impul'snogo plazmotrona s indukcionnym razryadom dlya polucheniya avtonomnyh plazmennyyh obrazovaniy. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 78, pp. 153-161. (in Russian).
4. **Vlasov A.N., Nikolaev A.V.** CHislennoe issledovanie plotnosti toka v indukcionnom razryade impul'snogo plazmotrona. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2024, no. 88, pp. 129-135. (in Russian).
5. **Bodrov M.V.** *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory: ucheb. posobie* (Thermal engineering measurements and devices: textbook. Manual) / M.V. Bodrov, V.Yu. Kuzin; Nizhegorod State Architectural - builds. Nizhny Novgorod University of Technology: NGASU. 2015. 176 p. (in Russian).
6. **Chernov E.I.** Fotopriyomnye ustrojstva na osnove fotodiodov i ih primenenie. *Obzory po elektronnoy tekhnike. Seriya 4, Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory. Vypusk 1*. 1986, 43 p. (In Russian).
7. **Vlasov A.N., Dubkov M.V., Burobin M.A., Manoshkin A.B., Nikolaev A.V. and others (10 people in total).** Provedenie issledovaniy indukcionnogo razryada pri bystrom spade sil'nogo magnitnogo polya v goryachej plazme s ispol'zovaniem ustanovki tipa «INGIR-Mega», imeyushchej induktivnyj nakopitel' dlya generirovaniya indukcionnogo razryada pri nakachke megavattnymi impul'sami. Otchet o NIR (zaklyuch.): 28-12. Ryazan. gos. radiotekh. un-t; ruk. Vlasov A.N. Ryazan'. 2013. No. GR 01201272674. Inv. no. 02201450296. (in Russian).
8. **Martynyuk M.M.** Fazovye perekhody pri impul'snom nagreve (Phase transitions during pulsed heating). Monografiya. Moscow: RUDN University Press. 1999. 332 p. (in Russian).