

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

А. С. Каторов, В. О. Ревазов, В. П. Селезнев

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

Введение

С появлением малогабаритных лазерных систем, представляет широкий научный и производственный интерес создание электрофизических установок и приборов, принцип действия которых основывается на оптическом управлении, когда устройство приводится в действие при попадании лазерного луча на определенные конструктивные элементы. Так, использование лазерного излучения для инициирования разряда в межэлектродном промежутке позволяет формировать импульсный искровой разряд за малые промежутки времени и с малым временным джиттером, что находит широкое применение в различных блоках мощных импульсных систем.

Формирование разряда оптическим излучением осуществляется одним из трех способов:

- лазерное излучение фокусируется на поверхности одного из электродов,
- лазерное излучение фокусируется в межэлектродном промежутке,
- коллимированное лазерное излучение проходит между параллельными электродами.

Ионизация газа в межэлектродном промежутке может быть вызвана тремя различными физическими механизмами [1]: нерезонансная многофотонная ионизация, резонансная многофотонная ионизация и электронное туннелирование. Первые два обычно происходят при использовании лазеров с наносекундной длительностью импульсов, а третий при фемтосекундной.

Оптический принцип инициирования разряда потенциально обладает самым низким временным джиттером [2] и работает в широком диапазоне напряжений (согласно [3, 4] от 4 кВ до 6 МВ), в частотных и одиночных режимах. Разряд может осуществляться в различных газах (воздух, водород, азот, SF₆, аргон, и др.) при различных давлениях. Однако особый интерес представляет процесс формирования искрового разряда оптическим излучением в воздухе при атмосферном давлении, так как при разработке оборудования, основанного на этом принципе, не потребуются решение технологических вопросов, связанных с герметизацией устройства.

Предметом данной работы является исследование механизмов инициирования импульсного разряда

да при напряжениях порядка единиц киловольт в воздухе, при атмосферном давлении.

Схема экспериментов

Исследования проводились в двухэлектродной системе, в которой лазерное излучение, поступало через отверстие в аноде диаметром 1 мм на катод. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Межэлектродное расстояние варьировалось в диапазоне от 0,7 мм до 1 мм. Напряжение на аноде менее 4 кВ.

В работе использовались два импульсных твердотельных Nd:YAG лазера с диодной накачкой и длиной волны лазерного излучения 1064 нм. Лазер 1: энергия импульса 1 мДж, длительность импульса 2,5 нс, энергетическая расходимость 5 мрад, диаметр луча на выходе 1,5 мм. Лазер 2: энергия импульса 5 мДж, длительность импульса 12 нс, энергетическая расходимость 5 мрад, диаметр луча на выходе 3 мм. В экспериментах использовалась собирающая линза с фокусным расстоянием 65 мм. Температура и влажность воздуха сохранялись в диапазоне от 22 °С до 25 °С и от 43 % до 53 %, соответственно.

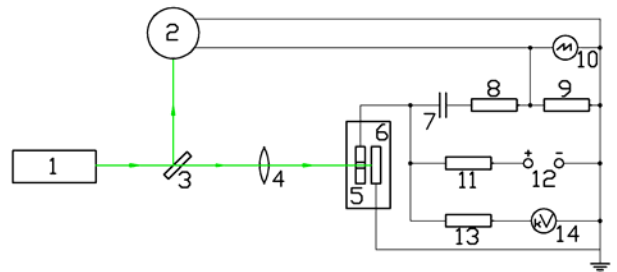


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – лазер импульсный твердотельный с диодной накачкой, 2 – фотодатчик, 3 – светоделительная пластина, 4 – собирающая линза, 5 – анод, 6 – катод, 7 – конденсатор, 8 – резистор (50 Ом), 9 – резистор (1 Ом), 10 – осциллограф, 11, 13 – резистор (25 кОм), 12 – источник постоянного тока, 14 – киловольтметр

При проведении эксперимента (рис. 1) импульс излучения лазера (1), попадая на светоделительную пластину (3), разделяется на две части. Первая часть поступала на фотодатчик (2), подключенный к осциллографу, а вторая, проходя через собирающую линзу (4) фокусировалась на поверхности катода из

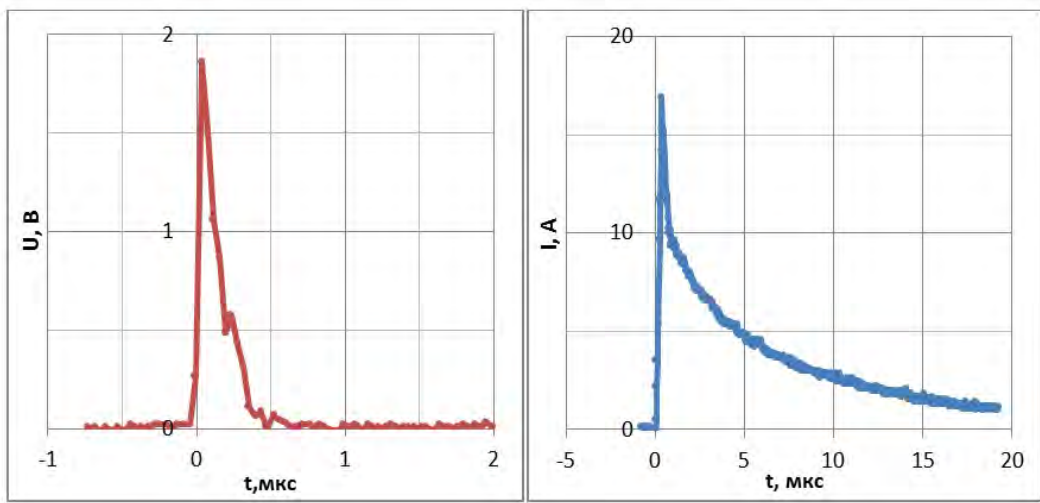


Рис. 2. Типичные осциллограммы: а – лазерный импульс; б – токовый импульс

сплава ВТ1-0, что приводило к ионизации газовой среды в межэлектродном промежутке. Далее, после получения сигнала с фотодатчика, осциллограф регистрировал протекание тока.

На рис. 2 представлена типичная осциллограмма лазерного (слева) и токового (справа) импульса.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены экспериментально полученная зависимость времени формирования разряда от интенсивности (плотности мощности) лазерного излучения для двух лазеров (лазер 1 и лазер 2), обладающих разной энергией и длительностью оптического импульса.

Время формирования разряда определялось, как промежуток времени между уровнями 0,5 и 0,1 амплитуды лазерного и токового импульса, соответственно. Интенсивность I лазерного излучения определялась как [5]:

$$I = \frac{4Q}{\pi\theta^2 F^2 \tau}, \quad (1)$$

где Q – энергия лазерного импульса, θ – энергетическая расходимость пучка лазерного излучения, F – фокусное расстояние собирающей линзы, τ – длительность лазерного импульса. Так как полученные зависимости для обоих лазеров совпадают, то можно сделать вывод о том, что время формирования разряда зависит только от интенсивности лазерного излучения, даже если энергия и длительность различны.

Величина максимального напряжения пробоя разрядного промежутка оптическим излучением в воздухе при атмосферном давлении ограничена напряжением самопробоя и зависит в данном случае от межэлектродного расстояния. Что касается минимального напряжения пробоя, то оно зависит от параметров лазерного импульса, рис. 4. На рис. 4а представлены результаты исследований зависимости

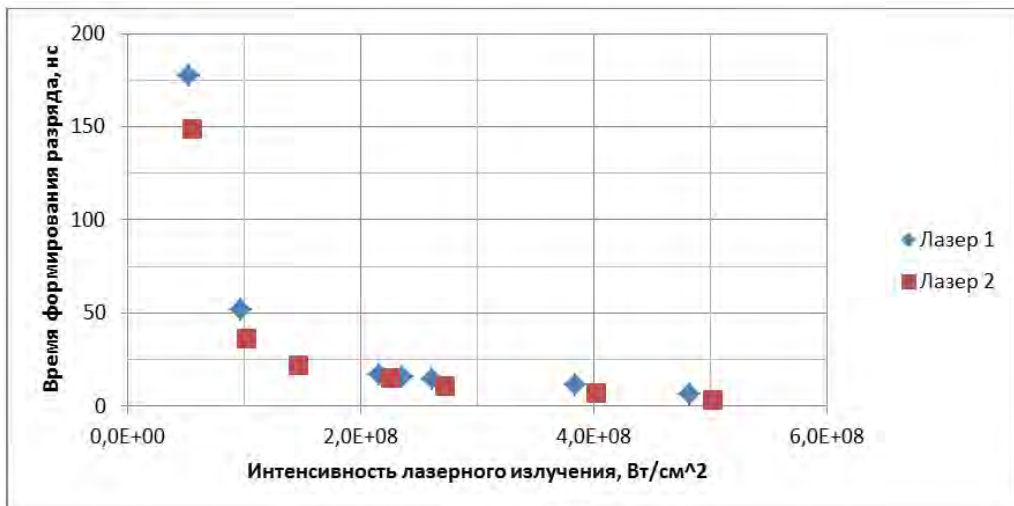


Рис. 3. Зависимость времени формирования разряда от интенсивности лазерного излучения

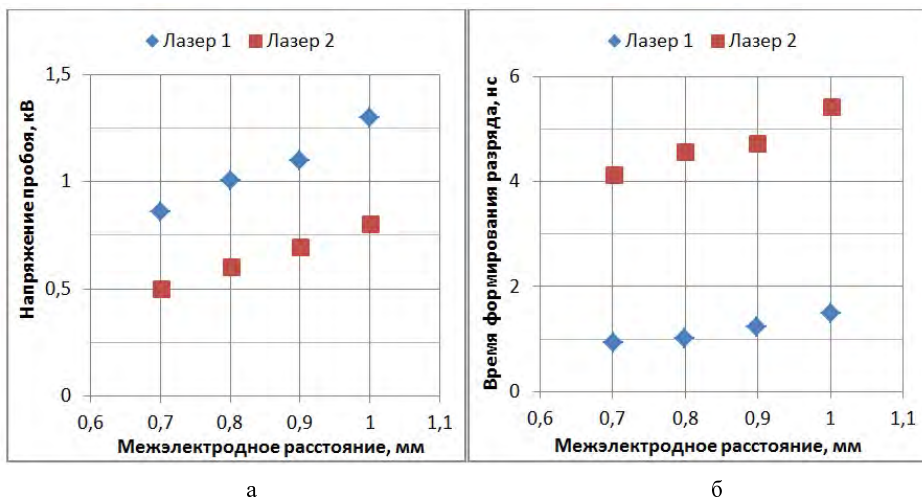


Рис. 4. Результаты исследований: а – зависимость минимального напряжения пробоя от межэлектродного расстояния; б – зависимость времени формирования разряда от межэлектродного расстояния

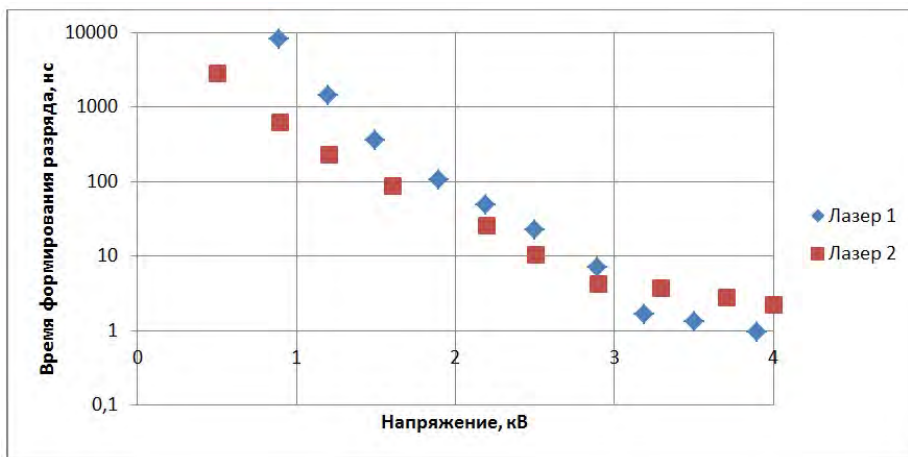


Рис. 5. Зависимость времени формирования разряда от напряжения на аноде

минимального напряжения пробоя от величины межэлектродного расстояния для лазеров 1 и 2 обладающих одинаковой интенсивностью

$$I = 4,9 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Показано, что лазер 2, обладающий большей энергией и длительностью, позволяет достичь на 40 % меньшего минимального напряжения пробоя, чем лазер 1.

При инициировании искрового разряда оптическим излучением, время формирования разряда уменьшается с увеличением напряжения на аноде. В экспериментах получены минимальные времена формирования токов разряда при различных межэлектродных расстояниях для обоих лазеров. Результаты представлены на рис. 4 (б). Напряжение на аноде $U = 0,99 U_{\text{пр}}$, где $U_{\text{пр}}$ – напряжение самопробоя.

Полученные зависимости демонстрируют, что лазер 1, обладающий малой длительностью импульса, формирует разряд на 75 % быстрее, чем лазер 2. В условиях эксперимента для лазера 1 и 2 средние скорости ионизации газовой среды между электро-

дами оцениваются как $4 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ и $2 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$, соответственно.

Исследование зависимости времени формирования разряда от напряжения на аноде проводилось при межэлектродном расстоянии равном 0,7 мм для каждого из лазеров. Результаты представлены на рис. 5. При напряжениях на аноде, близких к напряжению самопробоя ($U \geq 0,75 U_{\text{пр}}$), время формирования разряда лазером 1 ниже, чем лазером 2, однако при более низких напряжениях ($U < 0,75 U_{\text{пр}}$) наблюдается противоположный эффект.

При инициировании разряда оптическим излучением важную роль играет точная юстировка оптической системы. Как отмечалось выше, при проведении экспериментов лазерный импульс попадал на катод через отверстие в аноде диаметром 1 мм, таким образом, точка фокусировки находилась внутри окружности диаметром 1 мм, рис. 6.

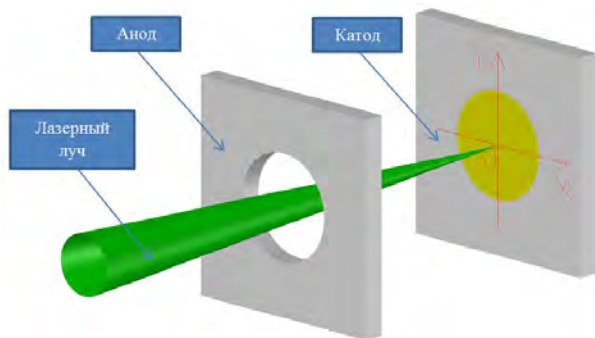


Рис. 6. Фокусировка лазерного излучения

Исследования влияния положения точки фокусировки лазерного импульса на временные параметры разряда проводились для межэлектродного расстояния равного 0,7 мм для напряжений на аноде равных $0,9 U_{пр}$ и $0,99 U_{пр}$. В экспериментах точка фокусировки перемещалась по оси X (по диаметру). Измерялось время формирования разряда и джиттер. Разряд формировал лазер 1. Результаты представлены на рис. 7.

Анализ представленных на рис. 7 данных выявил две характерных особенности:

1) время формирования разряда более стабильно при подаче на анод напряжения $0,9 U_{пр}$, чем при $0,99 U_{пр}$;

2) время формирования разряда уменьшается на 50 % при удалении точки фокусировки лазерного излучения от центра окружности, см. рис. 6).

Одной из основных характеристик разряда помимо времени формирования является время фронта. Время фронта – это время нарастания тока от уровня 0,1 до уровня 0,9 амплитуды. На рис. 8 показано экспериментально полученная зависимость времени фронта от напряжения для лазера 1 и межэлектродного расстояния 0,8 мм. Анализ представленных результатов показал, что в условиях эксперимента при протекании разряда конденсаторы разряжались не полностью, что указывает на необходимость дополнительных исследований причин данного явления.

Выводы

1. Время формирования разряда оптическим излучением в воздухе при атмосферном давлении определяется совокупностью параметров лазерного импульса – интенсивностью.

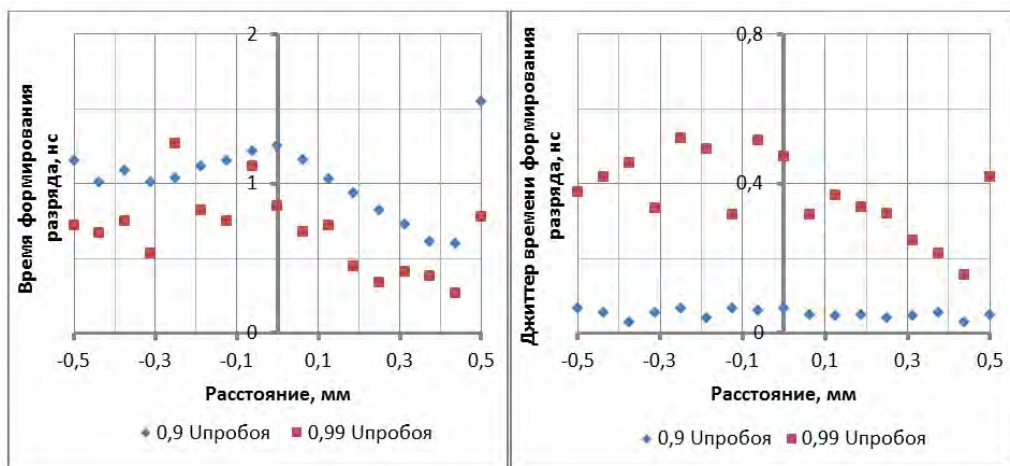


Рис. 7. Зависимость временных параметров формирования разряда от координаты точки фокусировки

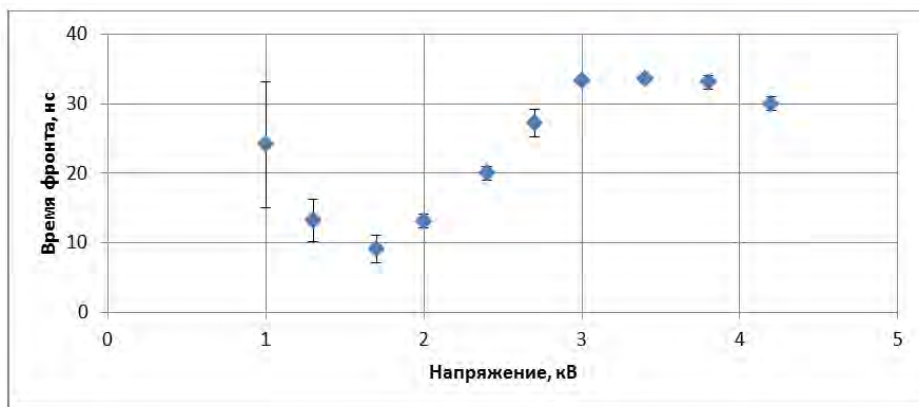


Рис. 8. Зависимость времени фронта от напряжения на аноде

2. При одинаковых интенсивностях оптического излучения лазер, обладающий большей энергией и длительностью:

- позволяет достичь меньшего минимального напряжения пробоя межэлектродного промежутка при атмосферном давлении в воздухе;

- формирует разряд медленнее при напряжениях, близких к напряжению самопробоя ($U \geq 0,75 U_{\text{пр}}$), и быстрее при ($U < 0,75 U_{\text{пр}}$);

3. Время формирования разряда уменьшается с увеличением напряжения, однако при подаче на анод напряжения $0,9 U_{\text{пр}}$ параметры формирования разряда более стабильны, чем при $0,99 U_{\text{пр}}$;

4. Время формирования разряда уменьшается на 50 % при смещении точки фокусировки от центра на расстояние 0,4 мм.

Литература

1. Weyl G. M. "Physics of laser-induced breakdown: An update," in *Laser-Induced Plasmas and Appli-*

cations, L. J. Radziemski and D. A. Cremers, Eds. New York: Marcel Dekker, 1989.

2. Larson A. Gas-discharge closing switches and their time jitter/ - IEEE Transactions on plasma science, vol. 40, no. 10, october 2012.

3. Brussaard G. J. H. and Hendriks J. "Photoconductive operation of a laser triggered spark gap," IEEE Trans. Dielect. Elect.Insul., vol. 14, no. 4, pp. 976–979, Aug. 2007.

4. K. R. LeChien, W. A. Stygar, M. E. Savage, P. E. Wakeland, V. Anaya, D. S. Artery, M. J. Baremore, D. E. Bliss, R. Chavez, G. D. Coombs, J. P. Corley, P. A. Jones, A. K. Kipp, B. A. Lewis, J. A. Lott, J. J. Lynch, G. R. McKee, S. D. Ploor, K. R. Prestwich, S. A. Roznowski, D. C. Spencer, S. D. White, and J. R. Woodworth, "6.1-MV, 0.79-MA laser-triggered gas switch for multimodule, multiterawatt pulsed-power accelerators," *Phys. Rev. Special Topics, Accelerators Beams*, vol. 13, no. 3, p. 030401, Mar. 2010.

5. Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов. – М.: Наука, 1974. С. 308.