

Исследование оптических пробойных явлений в газовых смесях сложного химического состава

12, декабрь 2013

DOI: 10.7463/1213.0669474

Локтионов Е. Ю., Пасечников Н. А., Протасов Ю. С., Протасов Ю. Ю.

УДК 533.9.07, 53.082.54, 621.373.8, 537.52

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

stcpe@bmstu.ru

Введение

Для ряда областей техники, где используется электрическое зажигание (двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины, химические ракетные двигатели), существенное повышение эффективности и экологической безопасности может быть достигнуто при переходе к оптическому или комбинированному электрооптическому инициированию пробоя.

Анализ экспериментальных зависимостей порогов электрического и оптического пробоя газов показывает, что пробойные значения напряженности электрического поля сопоставимы в диапазоне давлений многих газов $\sim 5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$ Па [1]. Это значит, что, начиная с этих давлений, лазерное инициирование пробоя может быть более энергетически эффективным, чем электрическое. Результатом лазерного воздействия на углеводородо-воздушные смеси может быть инициирование горения (теплового или кинетического) и оптического пробоя.

Преимущества лазерного инициирования пробоя в углеводородных топливных смесях заключаются в том, что концентрация вредных соединений (NO_x , CO, CH) в продуктах сгорания пропорциональна температуре в камере сгорания, понизить которую можно при использовании обедненных смесей. Поджиг таких смесей электрической искрой требует существенного увеличения мощности системы зажигания, что приводит к уменьшению ресурса свечи. Удельная мощность ДВС пропорциональна степени сжатия в камере сгорания, повышение давления в разумных пределах приводит к увеличению требуемого напряжения при электроискровом зажигании, в то время как порог лазерного зажигания снижается. Лазерное зажигание может эффективно применяться и при низких

давлениях в камере сгорания – при создании и импульсно-периодическом поддержании лазерной плазмы (оптический плазмотрон) в двигателях с непрерывной подачей топлива.

Целью данной работы является исследование возможности взаимного снижения порогов пробоя при одновременном оптическом и электрическом воздействии на газ, а также возможность снижения порогов пробоя основного газа при добавлении незначительных количеств другого.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (Рисунок 1) создана на основе вакуумной камеры малого объема, откачиваемой безмасляным вакуумным агрегатом (Pfeiffer vacuum TSH071e), давление в которой регистрируется мембранным вакуумметром (Ceravac STR100), нечувствительным к сорту газа. Давление газа в экспериментальном объеме изменяется от 10^5 до $4 \cdot 10^3$ Па. Источником лазерного излучения служит наносекундный ($\tau \sim 18$ нс) Nd:YAG-лазер (Lotis ТП LS-2147), в экспериментах использовалось излучение второй гармоники ($\lambda \sim 532$ нм) с максимальной энергией в импульсе $E_{max} \sim 0,35$ Дж, при воздействии которой спектрально-энергетические пороги пробоя инертных газов максимальны [2]. Излучение фокусировалось кварцевой линзой $F \sim 150$ мм в пятно диаметром $d_r \sim 0,12$ мм. Подвижные электроды обеспечивают возможность изменения параметра pd , характеризующего режим осуществления электрического пробоя согласно закону Пашена, расстояние между ними было зафиксировано на уровне $d \sim 3,8$ мм. Положительный потенциал до $U \sim 5$ кВ от блока питания (Stanford Research Systems PS350/5000V-25W) подавался через высоковольтный гермоввод на один из плоских электродов, второй электрод был заземлен. Регистрация факта пробоя осуществлялась по наличию вспышки при чисто оптическом и замыканию электрической цепи при комбинированном пробое. Для дозированного напуска спектрально чистых ($>99,998\%$, Linde gas) газов (He – потенциал ионизации $I_{He} \sim 24,47$ эВ, Ne $I_{Ne} \sim 21,55$ эВ, Ar $I_{Ar} \sim 15,75$ эВ, Kr $I_{Kr} \sim 13,99$ эВ) собран специальный узел, состоящий из откачиваемого буферного объема и регулируемого напускного клапана (Pfeiffer vacuum EVD 010H), соединенный с газовыми баллонами через редукторы. После напуска газа в мишенную камеру до нужного парциального давления (начиная с меньшего) буферный объем откачивался, и в него напускался другой газ.

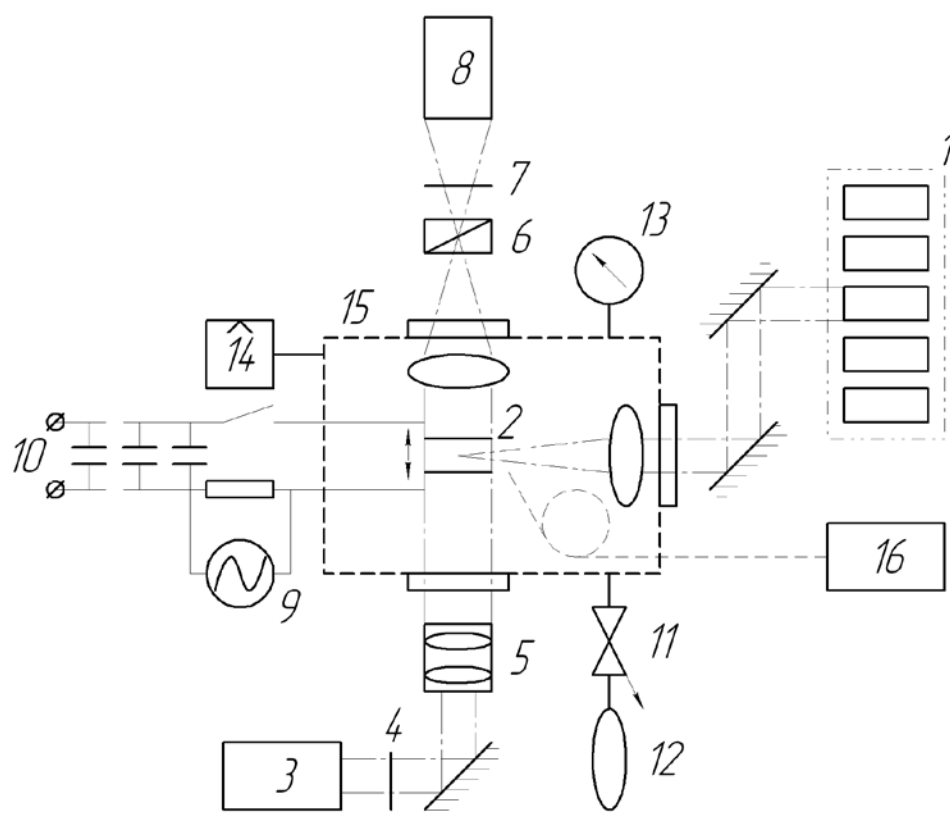


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

1 – Nd:YAG лазер с генераторами гармоник; 2 – электроды; 3 – диодный лазер; 4 – полуволновая пластинка; 5 – телескоп; 6 – призма Волластона; 7 – поляризационный фильтр; 8 – ПЗС-камера с ЭОП; 9 – осциллограф; 10 – высоковольтный блок питания; 11 – прецизионный напекатель; 12 – газовый баллон; 13 – мембранный вакуумметр (баратрон); 14 – безмасляный вакуумный агрегат; 15 – вакуумная камера; 16 – спектрометр с оптоволоконном

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Сначала были определены оптический и электрический пороги чистых газовых при различных давлениях (Рисунок 2), полученные результаты соответствуют известным из литературы [3], затем были определены пороги комбинированного пробоя, для чего при фиксированном напряжении изменялась плотность мощности излучения до достижения порога. Как известно, оптический пробой среды в известной степени имеет вероятностный характер. Зависимость вероятности оптического пробоя воздуха от плотности мощности излучения представлена на Рисунок 3. Далее для порогов оптического пробоя мы приводим значения плотности мощности излучения, соответствующие вероятности пробоя 50% [4]. Стоит отметить, что между сериями измерений напряжение отключалось для нейтрализации газа, т.к. накопление заряженных частиц приводило к искажению результатов измерений (особенно заметным этот эффект был при проведении контрольных экспериментов на <http://technomag.bmstu.ru/doc/669474.html>

воздухе). Для чистых газов снижение порога оптического пробоя в приложенном электрическом поле особенно ярко проявляется при пониженных давлениях.

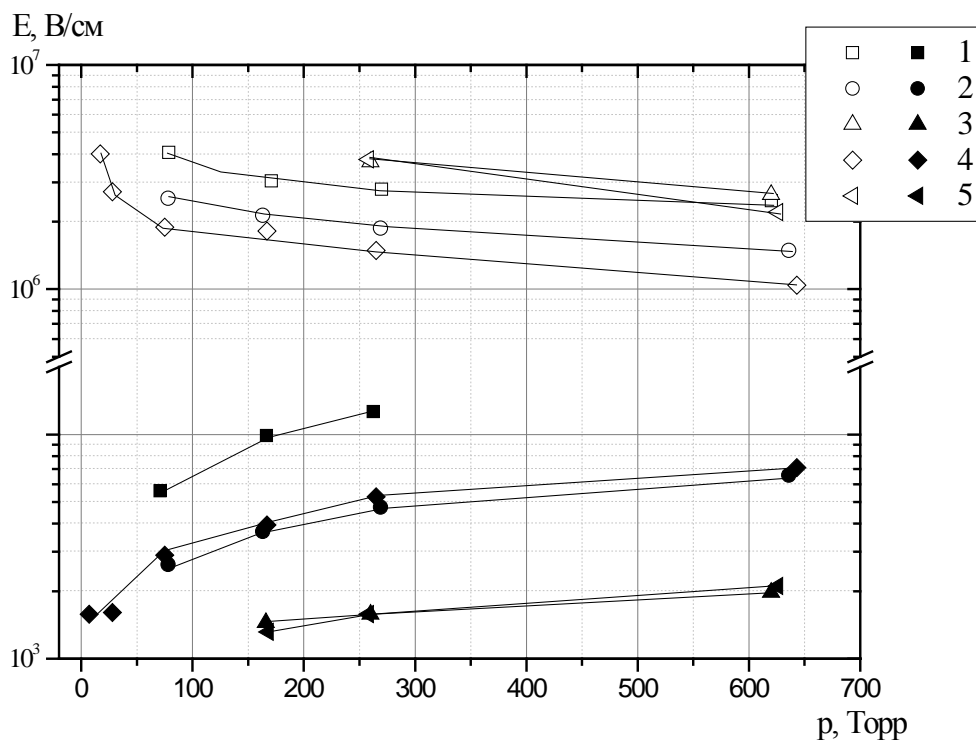


Рисунок 2 – Оптический и электрический пороги чистых газовых при различных давлениях. Темными символами показаны пороги электрического пробоя, светлыми – оптического; 1 – Воздух, 2 – Ar, 3 – He, 4 – Kr, 5 – Ne

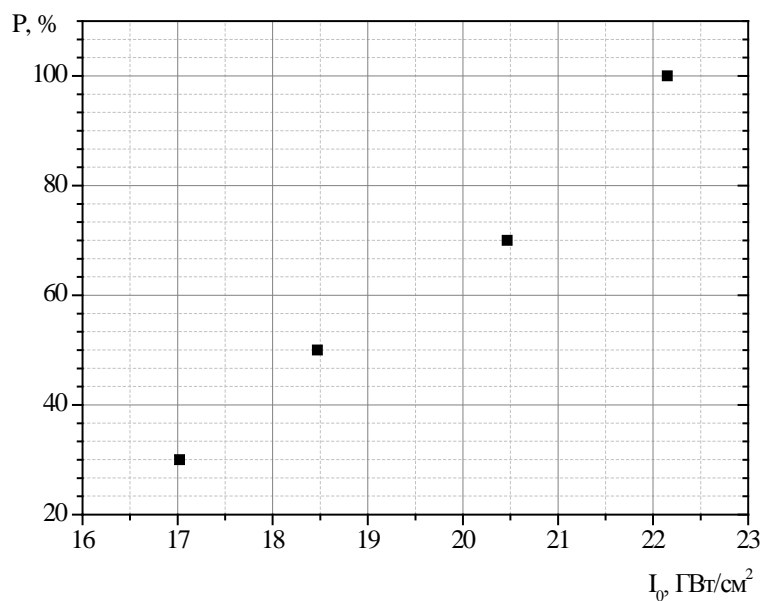


Рисунок 3 – Зависимость вероятности оптического пробоя атмосферного воздуха от плотности мощности лазерного излучения

Следующая серия экспериментов была проведена для выяснения необходимой концентрации (парциального давления) присадки, при которой становится заметным эффект снижения порогов оптического пробоя. Для этого концентрация присадки изменялась как 50 %, 40 %, 10 %, 5 %, 1 %. Как видно из Рисунок 4 и Рисунок 5, если эффект снижения порогов оптического пробоя имел место, то это происходило уже добавке небольшого количества присадки. Для Ne – Ar и Ne – Kr смесей увеличение концентраций присадок Ar и Kr свыше 1% и 5% соответственно уже не имело смысла с точки зрения снижения порога оптического пробоя вследствие эффекта Пеннинга. При добавлении 1% Ne в Ar (Рисунок 5) – аномального эффекта, упоминавшегося в [5], не выявлено. Снижение порога оптического пробоя по сравнению с чистым основным газом сопровождалось увеличением порога электрического пробоя, обратных случаев в наших экспериментах не выявлено. Для 90% Ne – 10% Kr ($p \sim 9 \cdot 10^4$ Па) наблюдался эффект увеличения порога электрического пробоя (Рисунок 6а), без снижения порога оптического, при уменьшении давления данное явление стало менее выраженным (Рисунок 6б).

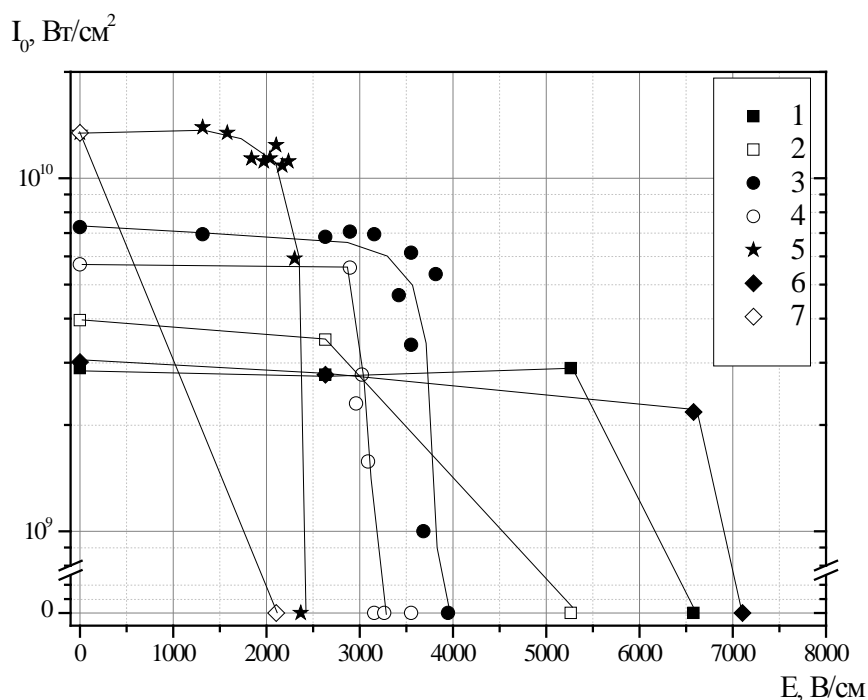


Рисунок 4 – Зависимость величины порога электрооптического пробоя смесей Ne – Kr ($p \sim 9 \cdot 10^4$ Па) от напряженности электрического поля и плотности мощности лазерного излучения

1 – 50% Ne – 50% Kr, 2 – 60% Ne – 40% Kr, 3 – 90% Ne – 10% Kr, 4 – 95% Ne – 5% Kr, 5 – 99% Ne – 1% Kr, 6 – 100% Kr, 7 – 100% Ne

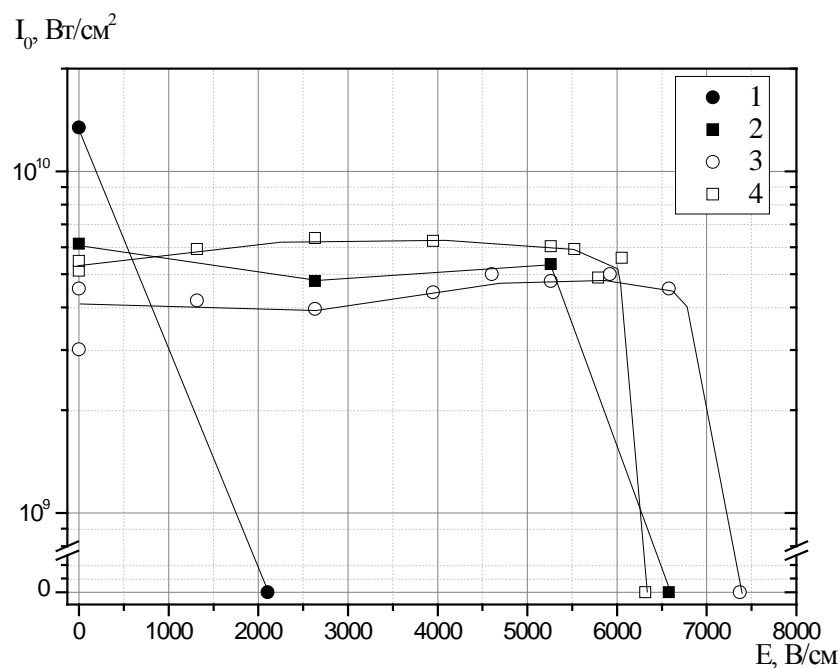
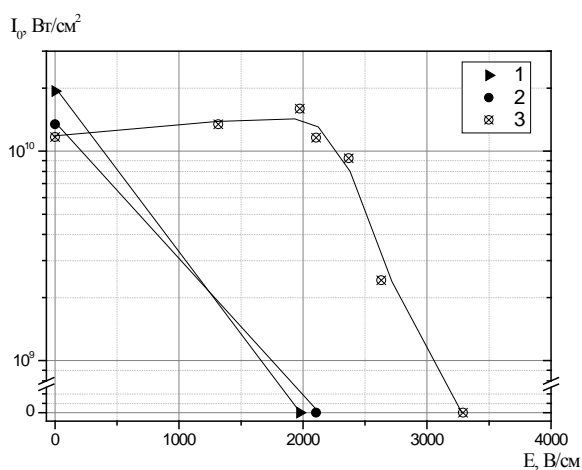
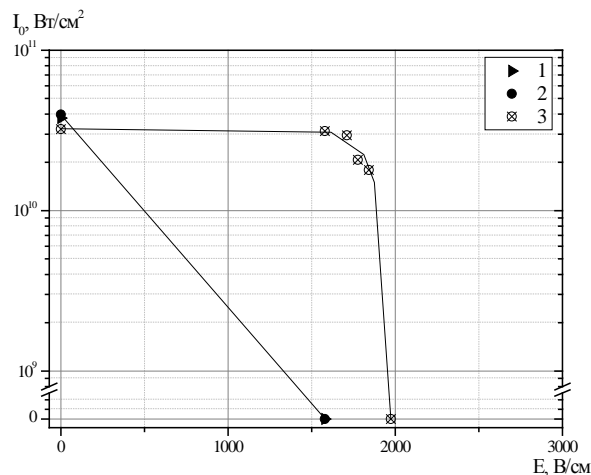


Рисунок 5 – Зависимость величины порога электрооптического пробоя смеси Ne – Ar ($p \sim 9 \cdot 10^4$ Па) от напряженности электрического поля и плотности мощности лазерного излучения

1 – 100% Ne, 2 – 100% Ar, 3 – 99% Ne – 1% Ar, 4 – 99% Ar – 1% Ne



а



б

Рисунок 6 – Зависимость величины порога электрооптического пробоя смеси Ne – He (а – $p \sim 9 \cdot 10^4$ Па, б – $p \sim 3.4 \cdot 10^4$ Па) от напряженности электрического поля и плотности мощности лазерного излучения

1 – 100% He, 2 – 100% Ne, 3 – 90% He – 10% Ne

В отличие от чистых газов и бинарных смесей нам не удалось найти в литературе результатов исследования пробойных явлений в тройных смесях. При выполнении серии экспериментов с добавлением к основному газу небольших количеств сразу двух присадок нами впервые обнаружен эффект взаимного подавления одной присадкой влияния другой на величины порогов электрического и оптического пробоя. Так взаимное подавление влияния (негативная интерференция) аргона и криптона (оба являются пеннинговскими присадками – Рисунок 4, Рисунок 5) наблюдалось в неоне (Рисунок 7).

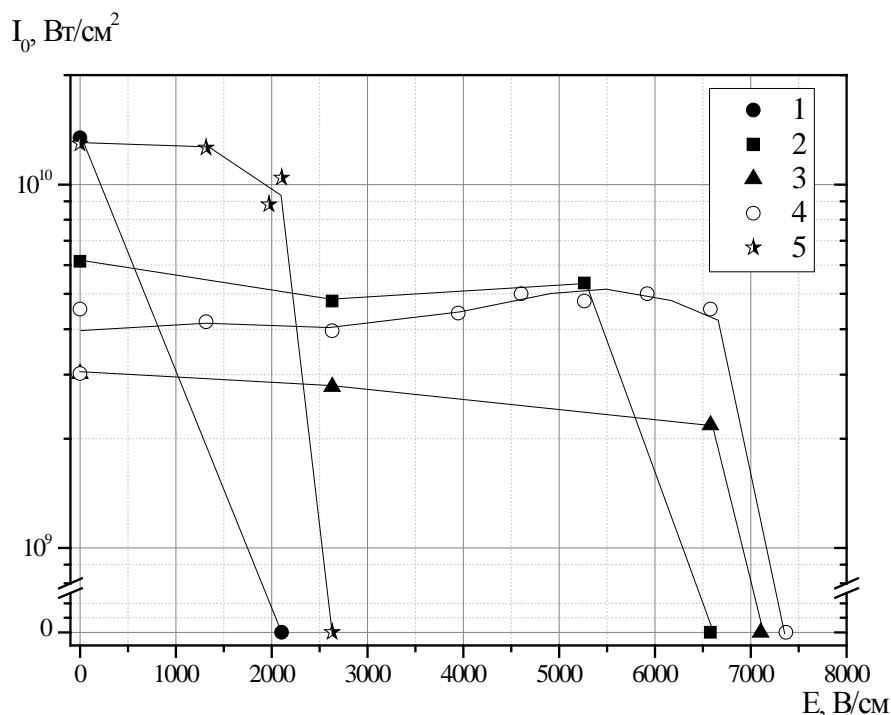


Рисунок 7 – Зависимость величины порога электрооптического пробоя смеси Ne – Ar – Kr ($p \sim 9 \cdot 10^4$ Па) от напряженности электрического поля и плотности мощности лазерного излучения

1 – 100% Ne, 2 – 100% Ar, 3 – 100% Kr, 4 – 99% Ne – 1% Ar, 5 – 98% Ne – 1% Ar – 1% Kr

Заключение

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований определены пороги оптического, электрического и комбинированного электрооптического пробоя для чистых инертных газов, их бинарных и тройных смесей с различным соотношением компонентов. Обнаружено, что снижение порога оптического пробоя в присутствии электрического поля особенно ярко проявляется при пониженных давлениях. Для некоторых бинарных смесей обнаружено снижение порога оптического пробоя (при этом порог электрического пробоя по отношению к порогу электрического пробоя

буферного газа повышается), при этом этот эффект проявляется уже при незначительных концентрациях присадок ~1–5%.

Для тройных смесей впервые обнаружено взаимное подавление влияния (негативная интерференция) пеннинговских присадок на изменение порогов пробоя. Таким образом, при попытках многофакторного снижения порогов пробоя влияние факторов может взаимно уничтожаться.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракты №№ 16.518.11.7016, 16.120.11.328-МК) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 13-08-01391, 11-08-00843).

Список литературы

1. Островская Г.В., Зайдель А.Н. Лазерная искра в газах // Успехи физических наук. 1973. Т. 111, № 4. С. 579-615. DOI: DOI: [10.1070/PU1974v016n06ABEH004094](https://doi.org/10.1070/PU1974v016n06ABEH004094)
2. Buscher H.T., Tomlinson R.G., Damon E.K. Frequency Dependence of Optically Induced GAS Breakdown // Physical Review Letters. 1965. Vol. 15, no. 22. P. 847-849.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2009. 736 с.
4. Воронина Э.И. Оптическая прочность полимерных материалов при их лазерной абляционной деструкции / Э.И. Воронина, В.П. Ефремов, В.Е. Привалов, П.В. Чартий, В.Г. Шеманин // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, № 5. С. 143-145.
5. Мульченко Б.Ф., Райзер Ю.П. Лазерный пробой смесей неона с аргоном и роль фотоионизации возбужденных атомов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1971. Т. 60, № 2. С. 643-650.

Investigation of optical disruptive discharges in complex gaseous mixtures

12, December 2013

DOI: 10.7463/1213.0669474

Loktionov E.Yu., Pasechnikov N.A., Protasov Yu.S., Protasov Yu.Yu.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation
stcpe@bmstu.ru

Optical, electrical and combined electro-optical thresholds of disruptive discharges for noble gases, their binary and triple mixtures of different compositions were experimentally evaluated. The possibility of mutual reduction in discharge thresholds at a simultaneous optical and electrical impact on gas was studied along with the possibility of reduction in thresholds of a combined discharge when basic gas has additions of another gas are made. It was shown that reduction in the threshold of an optical discharge in the presence of an electric field was quite significant at low pressures. For the first time mutual suppression (negative interference) of gaseous dopants' effect on changes in discharges' thresholds (both optical and electro-optical) in case of triple gas mixtures was demonstrated.

Publications with keywords: [the electrical, optical and electrooptic breakdown of gases](#), [spectral thresholds amount of energy of a breakdown](#), [pure, binary and triple mixtures of inert gases](#)

Publications with words: [the electrical, optical and electrooptic breakdown of gases](#), [spectral thresholds amount of energy of a breakdown](#), [pure, binary and triple mixtures of inert gases](#)

References

1. Ostrovskaya G.V., Zaydel' A.N. Lazernaya iskra v gazakh [Laser spark in gases]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1973, vol. 111, no. 4, pp. 579-615. DOI: [10.1070/PU1974v016n06ABEH004094](https://doi.org/10.1070/PU1974v016n06ABEH004094) (English translation: *Soviet Physics Uspekhi*, 1974, vol. 16, no. 6, pp. 834–855. DOI: [10.1070/PU1974v016n06ABEH004094](https://doi.org/10.1070/PU1974v016n06ABEH004094)).
2. Buscher H.T., Tomlinson R.G., Damon E.K. Frequency Dependence of Optically Induced GAS Breakdown. *Physical Review Letters*, 1965, vol. 15, no. 22, pp. 847-849.

3. Raizer Yu.P. *Gas Discharge Physics*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1991. 449 p. (Russ. ed.: Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada*. Dolgoprudnyy, Publishing House "Intellekt", 2009. 736 p.).
4. Voronina E.I., Efremov V.P., Privalov V.E., Chartiy P.V., Shemanin V.G. Opticheskaya prochnost' polimernykh materialov pri ikh lazernoy ablyatsionnoy destruktzii [Optical strength of polymer materials subjected to laser ablation-induced destruction]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2009, vol. 79, no. 5, pp. 143-145. (English translation: *Technical Physics*, 2009, vol. 54, is. 5, pp. 746-748. DOI: [10.1134/S1063784209050247](https://doi.org/10.1134/S1063784209050247)).
5. Mul'chenko B.F., Raizer Yu.P. Lazernyy probay smesey neona s argonom i rol' fotoionizatsii vzbuzhdennykh atomov [Laser Breakdown of Mixtures of Neon with Argon and the Role of Photoionization of Excited Atoms]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*, 1971, vol. 60, no. 2, pp. 643-650. (English translation: *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1971, vol. 33, no. 2, pp. 349-353.).