

03; 07; 12

© 1991 г.

## МНОГОКАДРОВАЯ СВЕРХСКОРОСТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ШЛИРЕН-СИСТЕМА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ПРЕДПРОБИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЖИДКОСТЯХ В НАНОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

*В. Ф. Клишкин*

Представлены результаты, касающиеся создания и применения шестикадровой сверхскоростной шлирен-системы для изучения начальной стадии электрического пробоя в жидкостях. Система основана на малогабаритной линии световой задержки, позволяющей сравнительно просто и плавно регулировать временной интервал между кадрами в пределах  $\sim 5$ —50 нс. В качестве источника подсветки использовался рубиновый лазер с длительностью импульса  $\sim 5$  нс. Пространственное (статическое) разрешение шлирен-системы составляет  $\sim 20$ —25 мкм. Эффективность системы продемонстрирована при наблюдении быстротекущих предпробивных процессов в жидкостях в наносекундном диапазоне.

### Введение

Значительный прогресс при исследовании механизма электрического разряда в жидкостях достигнут в связи с применением лазерной техники. Объясняется это тем, что сочетание лазерных источников света с известными оптическими методами (шлирен-методы, интерферометрия и др.) позволяет удовлетворить требованиям высокого временного и пространственного разрешения, что особенно важно при изучении начальной стадии пробоя. Следует отметить, что высокое временное разрешение может быть получено при использовании электронно-оптических преобразователей, однако ухудшение качества изображения ЭОП при наносекундных экспозициях ограничивает возможности их применения при изучении микрообъектов, изменяющихся с большими скоростями.

Первые советские исследования физической картины электрического разряда в жидкостях с использованием рубинового лазера в качестве источника подсветки в схеме высокоскоростного шлирен-фотографирования были выполнены в 1970—1974 г. [1, 2]. Это позволило впервые наблюдать пробой с анода в однородном поле и выявить некоторые важные детали его зарождения и развития. Полученные результаты показали перспективность данного направления исследований, которое получило интенсивное развитие в последующие годы. Применение многокадровых систем позволяет более надежно изучать динамику развивающихся процессов. Например, в [3, 4] с помощью трехкадровой лазерной шлирен-системы удалось более детально исследовать различные стадии электрического разряда в дистиллированной воде. Дальнейшее развитие нового экспериментального подхода к исследованию механизма электрического разряда в жидкостях связано с совершенствованием методов и техники сверхскоростной оптической регистрации. Особенности электрического разряда в жидкостях (многообразие и сложность явлений, малые характерные размеры  $\leq 10$  мкм, высокие скорости развития  $\sim 10^5$ — $10^7$  см/с) позволяют выделить ряд требований, предъявляемых к методам высокоскоростных оптических измерений: 1) высокое временное и пространственное разрешение: например, изучение явлений, развивающихся со скоростью  $\sim 10^5$ — $10^7$  см/с, с динамическим пространственным разрешением  $\sim 10$  мкм требует длительности импульсов под-

светки  $\sim 10-0.1$  нс; 2) высокая скорость регистрации процессов для изучения процессов с характерным временем развития  $\sim 10-100$  нс требуется частота съемки  $\sim 10^9-10^8$  кадр/с; 3) изменение интервала между кадрами в широком диапазоне ( $\sim 1-100$  нс); 4) высокая точность синхронизации кадров.

В кадровом режиме съемки требуемое число кадров составляет, как правило, 4-7. Энергия светового пучка должна быть достаточной для получения последующих кадров с соответствующей задержкой. Необходимо также сравнительно высокое качество пучка для получения надежных количественных данных. Схемы многокадрового фотографирования, основанные на линиях световой задержки с лазерным источником освещения [5], удовлетворяют этим требованиям в значительной степени.

В данной работе приведено описание шестикадровой сверхскоростной шпирен-системы и представлены результаты ее применения для наблюдения предпробивных явлений в жидкостях в наносекундном диапазоне.

### Краткое описание шпирен-системы

Шпирен-система состоит из малогабаритной линии световой задержки, зеркально-призменного блока для сведения пучков и приемного устройства [6]. На рис. 1, а представлена принципиальная оптическая схема шпирен-системы без приемного устройства. Линия световой задержки включает в себя два основ-

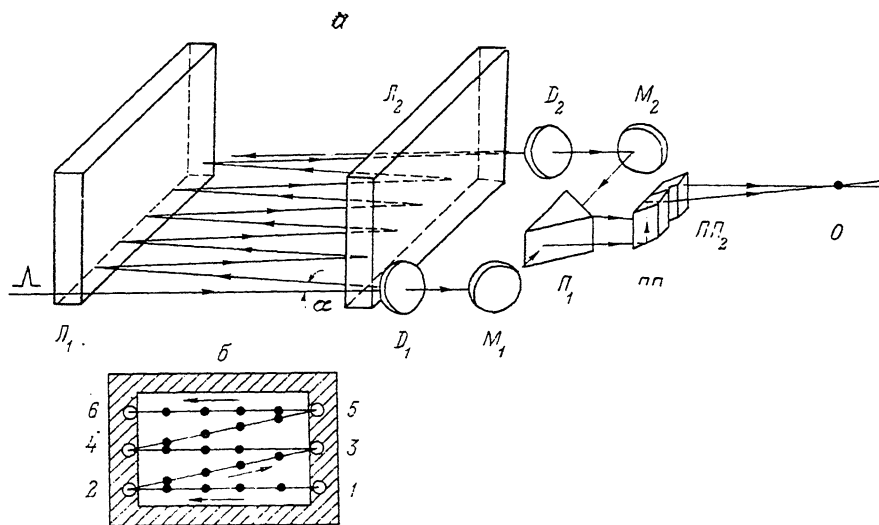


Рис. 1.

а — принципиальная оптическая схема шпирен-системы;  $L_1, L_2$  — основные зеркала линии световой задержки;  $D_1, D_2$  — делительные пластинки;  $M_1, M_2$  — поворотные зеркала;  $P_1$  — призма;  $O$  — исследуемый объект;  $P_1, P_2$  — перископические призмы; б — схематическое изображение работы зеркала  $L_2$  линии световой задержки: темные кружки — изображения пучков на поверхности зеркала при последовательных отражениях, 1-6 — отверстия в оправе зеркала для вывода соответствующих пучков.

ных зеркала  $L_1, L_2$  и пять делительных пластинок с плавно увеличивающимся коэффициентом пропускания. На рис. 1, а показаны только две делительные пластинки  $D_1$  и  $D_2$ . Расстояние между зеркалами  $L_1$  и  $L_2$  составляло 70 см. Лазерный пучок вводится в линию световой задержки после отражения от первой делительной пластинки  $D_1$ . После ряда последовательных отражений от зеркал  $L_1$  и  $L_2$  пучок падает на вторую делительную пластинку  $D_2$ . Часть пучка проходит через нее, а основная часть отражается и снова вводится в линию световой задержки. Рис. 1, б поясняет работу зеркала  $L_2$ . Видно, что временная задержка между пучками обеспечивается их многократными прохождением между двумя основными зеркалами линии световой задержки. Меняя угол вхождения пучков  $\alpha$  (управляя числом отражений в линии), можно сравнительно просто и плавно регулировать длительность задержки, не меняя расстояние между основными зеркалами. Рис. 1, а соответствует получению кадров  $I$

и 2 (линии 1—2 на рис. 1, б). Таким образом, на выходе линии формируются шесть световых пучков, задержанных во времени и разделенных в пространстве. Расчет линзы задержки проводился с учетом ослабления интенсивности пучков за счет дифракционной расходимости. Зеркально-призменный блок приближает пучки к главной оптической оси системы и направляет их на исследуемый объект ( $O$  на рис. 1, а) под малыми углами ( $\sim 3 \cdot 10^{-2}$  рад). Он содержит в себе шесть дополнительных зеркал, три трехгранные призмы с отражающими гранями и четыре перископические призмы. На рис. 1, а показаны два дополнительных зеркала  $M_1$  и  $M_2$ , одна трехгранная призма  $П_1$ , две перископические призмы  $ПП_1$  и  $ПП_2$ . Аналогичная оптическая схема используется при получении кадров 5 и 6. В схеме формирования кадров 3, 4 перископические призмы не используются. Приемное устройство включает в себя шесть специально отобранных объективов с фокусным расстоянием 30 см, апертурные диафрагмы и шесть фотоаппаратов «Зенит-Е». Анализ пространственной разрешающей способности позволил определить влияние наклонного падения пучков на величину предельного разрешения. Оценки предельного (статического) разрешения шплирен-системы с учетом свойств фотоматериала показали, что оно находится в пределах 20—25 мкм. Чувствительность шплирен-системы при регистрации градиентов показателя преломления зависела от апертуры объективов ( $\sim 5 \times 10^{-2}$  рад). В кадровом режиме съемки временное разрешение определяется длительностью экспозиции кадра. В качестве источника подсветки использовался рубиновый лазер с длительностью импульса около 15 нс. Для улучшения временного разрешения время экспозиции кадра было уменьшено до  $\sim 5$  нс путем использования схемы «обострения» лазерного импульса источника освещения [7]. Настройка шплирен-системы и установка импульсного лазера осуществляются с помощью гелий-неонового лазера.

Шплирен-система позволяет получить при одном включении рубинового лазера шесть кадров с длительностью экспозиции каждого кадра  $\sim 5$  нс и легко регулируемым (не обязательно равномерным) временным интервалом между ними в пределах  $\sim 5$ —50 нс. Следует отметить, что по временному и пространственному разрешению, скорости регистрации она превосходит экспериментальную технику, обычно применяемую при изучении начальной стадии электрического пробоя в жидкостях (см., например, [8]).

### Экспериментальные результаты

Шплирен-система была использована при исследовании динамики электрического разряда в жидкостях. Особенно эффективным оказалось ее применение при наблюдении быстроменяющихся предпробивных процессов в наносекундном диапазоне. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены типичные шплирен-фотографии электрического разряда в дистиллированной воде (удельное сопротивление  $\sim 10^5$  Ом·см) с анода при напряжении на промежутке 32 кВ (поле вблизи острейшего электрода  $\sim 1.9$  МВ/см). Условия эксперимента аналогичны описанным в [9]. Видно, что за характерное время  $\leq 100$  нс удается проследить за зарождением и развитием электрического разряда в промежутке. Анализ большого числа шплирен-фотографий позволил выявить детали, касающиеся механизма пробоя в этих условиях. Его зарождение связано с возникновением вблизи острейшего электрода первичных ионизационных (стримерных) каналов со слабым градиентом плотности. Развитие стримерных каналов сопровождается фазовым переходом, возникновением микропузырьков и их гидродинамическим расширением. Поперечный размер каналов увеличивается до нескольких десятков микрон, градиент плотности становится значительным, и они хорошо видны на шплирен-фотографиях. Кадры 1—4 на рис. 2 как раз и отображают эту стадию электрического разряда. Стримерные каналы распространяются по радиальным направлениям, поэтому начальное возмущение имеет примерно сферическую форму. Возможно, что картина несколько усложняется генерацией ударных волн в результате интенсивного поглощения энергии в стримерных каналах. Скорость развития разряда по данным кадров 1—4 составляет  $\sim 3$ — $4 \cdot 10^5$  см/с. Последующие кадры на рис. 2 показывают возникно-

вление и распространение более быстрой стадии электрического разряда. Ее зарождение происходит на фронте начального возмущения, соответствующего границе первичных стримерных каналов (кадр 4). Скорость развития стримерных каналов значительно увеличивается. Наблюдаются многочисленные их разветвления, электрический разряд имеет форму кисти (или куста) и сильно рассеивает внешний свет (темная область на фотографиях). Скорость распространения кистевого разряда по данным кадров 4—6 составляет  $\sim 4-3 \cdot 10^6$  см/с и несколько уменьшается по мере продвижения в глубь промежутка. Впереди сильного возмущения (темная область) на кадре 6 видно множество стримерных каналов, слабо рассеивающих свет, некоторые из которых достигли катода. Кадр 6 на рис. 2 получен примерно за 2—3 нс до пробоя промежутка. Распро-

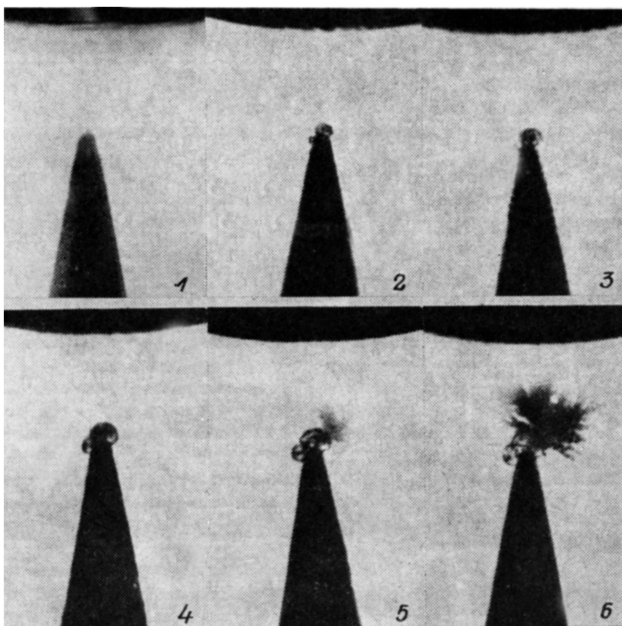


Рис. 2. Сверхскоростные лазерные шпирен-фотографии электрического разряда в воде с анода.

Время запаздывания пробоя 90 нс. Расстояние между электродами 1 мм. Длительность экспозиции каждого кадра 5 нс. Временной интервал между первым и вторым кадрами 25 нс, между остальными — 10 нс.

странение ионизации с большой скоростью  $\leq 2 \cdot 10^7$  см/с в последующий момент и завершает начальную стадию формирования электрического разряда. Именно высокая скорость регистрации шпирен-системы (до 100 млн кадр/с) как раз и позволила наблюдать переход к более быстрой стадии электрического разряда и ее развитие.

Установлено влияние структуры жидкости на механизм пробоя с анода. Например, в прозрачном, хорошо очищенном трансформаторном масле (прочность по ГОСТу 70 кВ) возникновение стримерных каналов в промежутке носит случайный характер. Даже при более высоких напряженностях поля вблизи острейшего электрода  $\sim 3$  МВ/см не происходит возникновения интенсивного кистевого разряда, когда скорости предпробивных процессов увеличиваются до  $10^6-10^7$  см/с, что и определяет более высокую импульсную электрическую прочность масла по сравнению с дистиллированной водой. Получены другие интересные и важные результаты.

Применение шпирен-системы может оказаться полезным при исследовании сверхбыстрых процессов в газах, конденсированных средах и высокотемпературной плазме.

Автор искренне признателен В. А. Арбузову и В. П. Бородину за помощь при выполнении работы.

Список литературы

- [1] Алхимов А. П., Воробьев В. В., Клишкин В. Ф. и др. // ДАН СССР. 1970. Т. 194. № 5. С. 1052—1054.
- [2] Абрамян Е. А., Корнилов В. А., Лагунов В. М. и др. // ДАН СССР. 1971. Т. 201. № 1. С. 56—59.
- [3] Клишкин В. Ф., Пономаренко А. Г. // Вопросы газодинамики. Новосибирск, 1975. № 5. С. 260—262.
- [4] Клишкин В. Ф., Пономаренко А. Г. // Тр. XIV Междунар. конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. М., 1980. С. 385—389.
- [5] Островская Г. В., Островский Ю. И. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4. Вып. 4. С. 121—124.
- [6] Арбузов В. А., Клишкин В. Ф. // Тр. IV Всесоюз. конф. «Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности». Николаев, 1988. Ч. I. С. 76—77.
- [7] Klimkin V. F., Soloukhin R. I., Wolansky P. // Combust. and Flame. 1973. Vol. 21. N 1. P. 111—117.
- [8] Forster E. O. // IEEE Trans. Elec. Insul. 1985. Vol. 20. N 6. P. 905—912.
- [9] Клишкин В. Ф. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 4. С. 54—58.

Новосибирский государственный университет  
им. Ленинского комсомола

Поступило в Редакцию  
30 августа 1990 г.

