

УДК 53.01/09:53.05

ДИАГНОСТИКА ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В. Г. Баграмов¹, Г. Л. Даниелян², А. С. Насибов¹, В. А. Подвизников²,
И. Д. Тасмагулов¹, В. К. Чевокин²

Рассмотрено устройство многоканальной системы для диагностики излучательных процессов в различных зонах ($n > 2$) разряда, возникающего в полупроводниках под действием импульсов высокого напряжения. Система позволяет регистрировать в реальном масштабе времени спектры, динамику и энергию излучения в 9-ти зонах излучающего объекта диаметром 200–400 мкм. Регистрирующая аппаратура связана с исследуемым объектом волоконно-оптическими кабелями (ВОК). Временное разрешение системы в зависимости от диаметра ВОК может меняться от 40 до 250 пс. Приведен пример одновременного исследования пространственно-временных характеристик стримерного разряда в 7 точках полупроводниковой пластины из CdS_xSe_{1-x} .

Ключевые слова: регистрирующая аппаратура, стрик-камера, стримерный разряд, полупроводники, оптоволоконные кабели.

Исследование характеристик стримерного разряда в полупроводниках и диэлектриках под действием импульсов высокого напряжения (10^4 – 10^5 В) ультракороткой длительности (10^{-10} – 10^{-9} с) является достаточно сложной экспериментальной задачей [1–7]. Для изучения физических процессов в возбужденных полупроводниках и условий возникновения индуцированного излучения желательнее исследовать динамику быстропротекающих процессов в различных точках возбужденного полупроводника. Исследо-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nas2121@mail.ru.

² ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

вания динамики излучения проводились и ранее (см., напр., [10]), однако, при необходимости одновременной регистрации в нескольких точках исследуемого микрообъекта ($n > 2$), возникают существенные экспериментальные трудности. Действительно, длина стримера в полупроводниках обычно не превышает 5–10 мм, а диаметр канала несколько десятков микрон. Ниже приводится описание стенда, позволяющего одновременно проводить диагностику излучения в нескольких точках (до 9) в газовых средах и полупроводниках, возбуждаемых ультракороткими импульсами высокого напряжения. Стенд отличается компактностью и широтой функциональных возможностей.

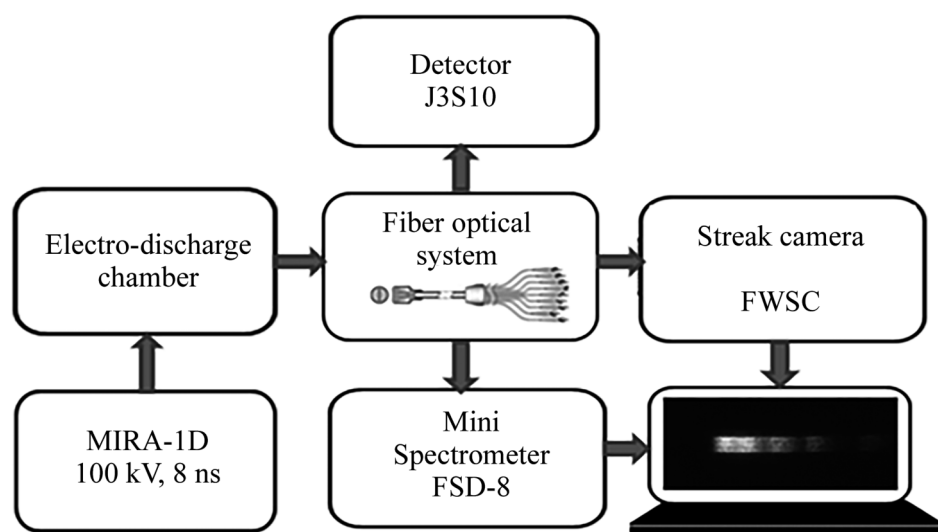


Рис. 1: Блок-схема комплекса для пространственно-временной диагностики излучательных процессов в реальном масштабе времени.

Состав аппаратуры для определения характеристик стримерного разряда приведен на рис. 1. Он состоит из генератора наносекундных импульсов высокого напряжения, электроразрядной камеры с исследуемым образцом, скоростной стрик-камеры с электронно-оптическим преобразователем, миниспектрометра, прибора для измерения энергии излучения, системы связи из волоконно-оптических кабелей и компьютерной аппаратуры. В качестве генератора импульсных напряжений (ГИН) использован высоковольтный блок от малогабаритного рентгеновского аппарата МИРА-1Д. ГИН формирует импульсы высокого напряжения с амплитудой 100 кВ и длительностью по основанию 8 нс. Электроразрядная камера коаксиальной конструкции (рис. 2) с полупроводниковым образцом и системой волоконно-оптических кабелей (ВОК) соединяется через высоковольтный разъем (1) с ГИН. Импульс высокого напряжения с крутизной

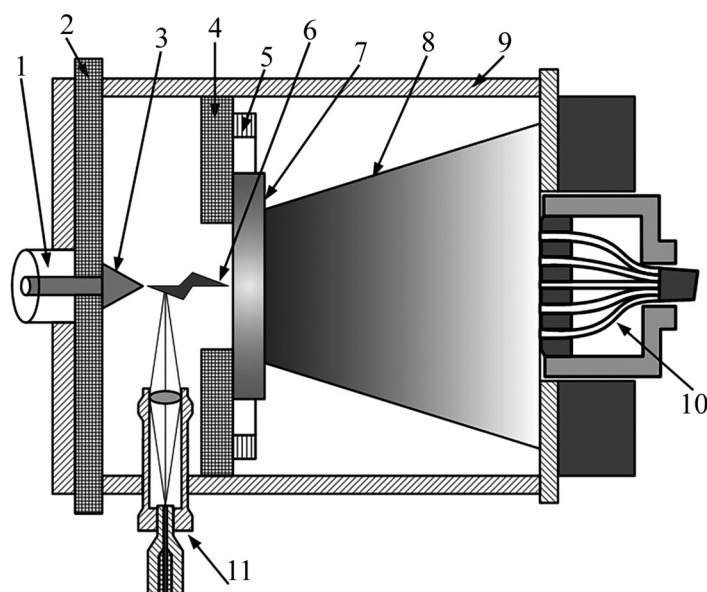


Рис. 2: Устройство электроразрядной камеры: 1 – высоковольтный вход; 2 – крышка из изоляционного материала с отверстием для высоковольтного электрода; 3 – высоковольтный электрод; 4 – диэлектрическая подложка; 5 – кольцевой промежуточный электрод; 6 – разрядное отверстие; 7 – полупроводниковая пластина; 8 – фокон; 9 – металлический цилиндр с крышкой; 10 – оптический разъем с ВОК; 11 – коннектор с линзой для фокусировки излучения на торец ВОК, для синхронизации стрик-камеры.

нарастания 10^{12} – 10^{13} В/с подается на электрод (3). После пробоя разрядного промежутка максимальная напряженность электрического поля возникает по кромке отверстия (6) в диэлектрической подложке (4). Меняя диаметр кольцевого электрода (5), можно изменять интенсивность свечения и длину стримерного разряда в полупроводнике. Фокон (8) увеличивает изображение стримера в 2.2 раза и служит изолятором для развязки оптического разъема ВОК (10) от высокого напряжения. Свечение отдельных элементов исследуемого объекта (в данном случае стримерного разряда) по многоканальной системе ВОК передается на вход скоростной стрик-камеры FWSC разработки Института общей физики РАН (ИОФРАН) [8] и позволяет регистрировать динамику развития излучательных процессов в реальном масштабе времени в 9 точках. Максимальное временное разрешение зависит от диаметра ВОК и может меняться от 40 до 250 пс. Устройство многоканального жгута ВОК показано на рис. 3. Для регистрации спектров излучения применен миниспектрометр FSD-8 с волоконным вводом. Энергия излучения отдельной выбранной точки исследуемого объекта диаметром 100–400 мкм

замеряется детектором J3S10 с максимальной чувствительностью 10^{-10} Дж. Обработка спектров, формы и динамики излучения осуществляется с помощью компьютера и результаты наблюдаются на мониторе.

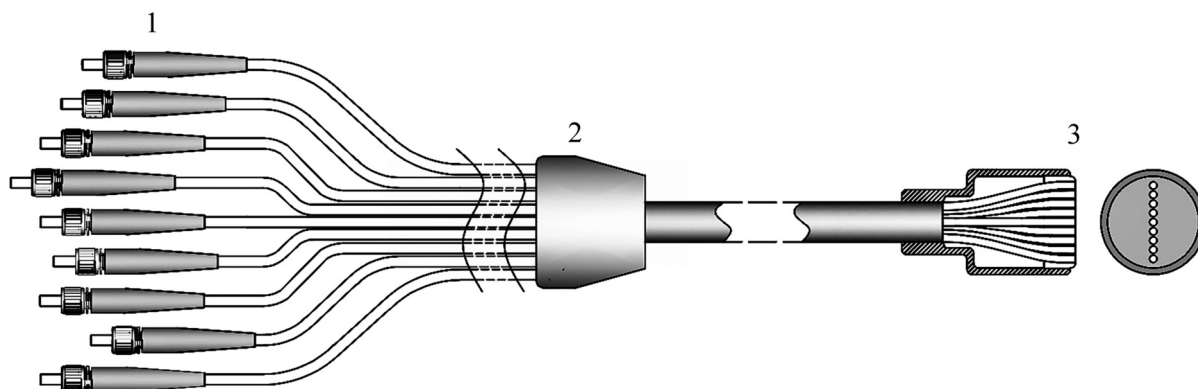


Рис. 3: Многоканальный волоконно-оптический ввод в стрик-камеру для одновременной регистрации излучения в различных зонах исследуемого объекта. 1 – система ВОК с оптическими разъемами, 2 – переходной многоканальный оптический разъем, 3 – многоканальный адаптер для соединения со стрик-камерой.

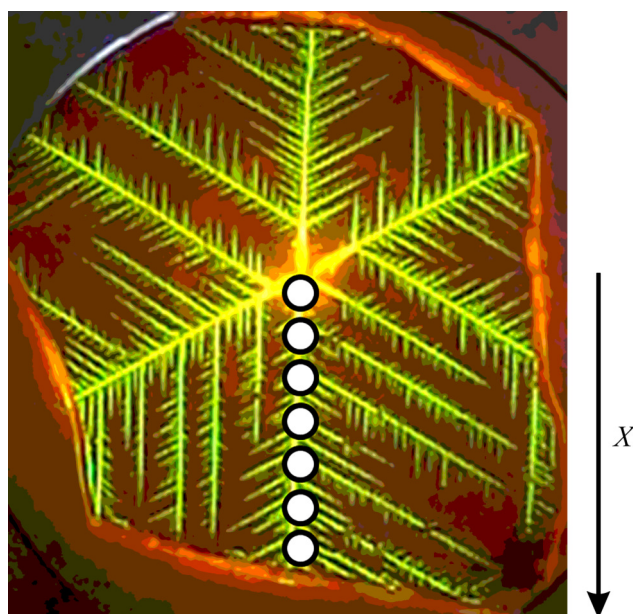


Рис. 4: Фотография увеличенного изображения стримерного разряда в $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ на выходной плоскости фокуса. Кружками показано расположение гребенки из 7 ВОК вдоль одного из треков стримера.

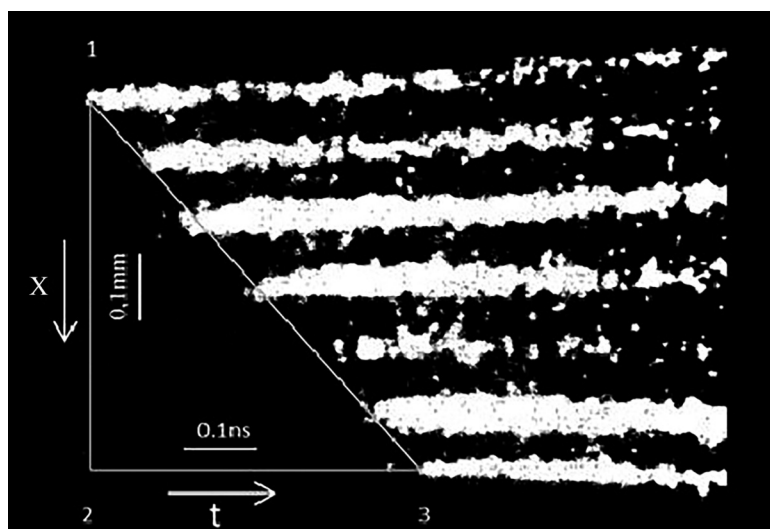


Рис. 5: Фотохронограмма свечения 7 точек канала стримера. 1–2 соответствует длине трека стримера; 2–3 задержке начала свечения 7-ой точки. Стрелками показаны направления движения стримера и отсчета времени.

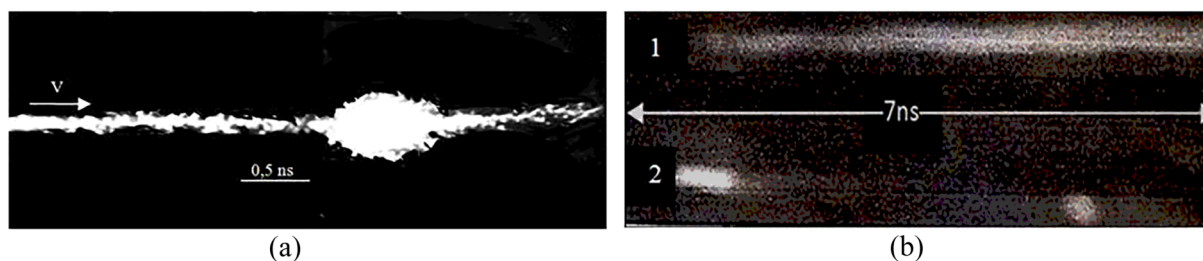


Рис. 6: Фотохронограмма вспышки генерации лазерного излучения в канале стримерного разряда (a). Фотохронограммы свечения разряда (1) в разрядном промежутке камеры и двух вспышек генерации лазерного излучения (2) в канале стримера (b).

На рис. 4 показано увеличенное фоконом изображение стримерного разряда в пластине полупроводникового соединения $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$, излучающего в желто-зеленой области спектра. Кружками на рисунке отмечено расположение 7-ми торцов кабелей (ВОК) вдоль одного из треков. Фотохронограмма свечения 7-ми точек трека приведена на рис. 5. Скорость движения головки стримера, рассчитанная с учетом длины трека и времени задержки свечения между точками 2 и 3, $V \approx 10^9$ см/с. Видно, что скорость движения на отрезке 1–2 практически постоянна. Из фотохронограммы следует, что свечение канала продолжалось в течение всего времени распространения стримера. Значительная ширина спектра $\Delta\lambda = 25$ нм и отсутствие других характерных при-

знаков лазерной генерации (резкое улучшение направленности и увеличение мощности излучения) показали, что в данном случае генерация лазерного излучения не была достигнута. При увеличении напряженности электрического поля на различных участках стримерного канала наблюдались яркие вспышки генерации (суперлюминесценции). На рис. 6(a) показана развертка излучения отдельного стримерного канала. Из фотохронограммы видно, что генерация возникла примерно через 2.5 нс после возникновения стримера, длительность лазерного излучения составила ~ 1 нс. В этом случае торец ВОК устанавливался напротив выхода стримера на поверхность полупроводниковой пластины. На рис. 6(b) представлены фотохронограммы – развития разряда в разрядном промежутке (6) диодной камеры (рис. 3) и двух вспышек излучения в канале стримера. Максимальная энергия излучения, зарегистрированная в этих экспериментах, равнялась $(1 - 3) \cdot 10^{-7}$ Дж, при длительности импульса света ~ 1 нс. С учетом диаметра генерирующей площади интенсивность излучения превышала 10^7 Вт/см², что хорошо коррелирует с интенсивностью лазерного излучения, полученного при возбуждении полупроводников ультракороткими импульсами электронного пучка [8].

Приведенные результаты показали, что система диагностики быстропротекающих процессов удобна в эксплуатации и позволяет одновременно наблюдать динамику развития излучательных процессов, регистрировать спектр и энергию в различных точках исследуемого микрообъекта.

Работа выполнена для проведения исследований по теме № 10 Президиума РАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г. А. Месяц, А. С. Насибов, В. Г. Шпак и др., ЖЭТФ **133**(6), 1162 (2008).
- [2] K. V. Bereznoi, A. S. Nasibov, A. G. Reutova, et al., Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) **18**(4), 285 (2009).
- [3] K. V. Bereznoi, M. B. Bochkarev, A. S. Nasibov, et al., Instruments and Experimental Techniques **53**(2), 272 (2010).
- [4] А. С. Насибов, Г. Л. Даниелян, В. Г. Баграмов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(4), 17 (2011).
- [5] А. С. Насибов, К.В. Бережной, В.Г. Баграмов и др., Сб. докладов 22 международной конференции “Лазеры. Измерения. Информация” (из-во Политехнического университета, С.-Петербург, 2012), Т. 2. С. 347–356.
- [6] А. С. Насибов, В. Г. Баграмов, К. В. Бережной, П. В. Шапкин, Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(4), 25 (2013).

- [7] Б. Е. Дашевский, В. А. Подвязников, А. М. Прохоров и др., Оптико-механическая промышленность, № 8, 18 (1988).
- [8] A. S. Nasibov, K. V. Berezhnoy, M. B. Vochkarev et al., Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(1), 3 (2017).

Поступила в редакцию 21 ноября 2017 г.