

УДК 537.5:535.376

## ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ $Cd_xZn_{1-x}S$ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИШЕНИ ГАЗОВОГО ДИОДА

А. С. Насибов, Г. Л. Даниелян, В. Г. Баграмов, К. В. Бережной,  
П. В. Шалкин

*В работе приведены результаты экспериментов по исследованию излучения полупроводниковых  $Cd_xZn_{1-x}S$  мишеней (ПМ) газового диода (ГД), при изменении давления от  $10^{-1}$  торр до атмосферного. На катод ГД подавались импульсы амплитудой до 200 кВ и длительностью 0.5–1 нс. До давления 2.5 торр в ПМ под действием пучка ускоренных убегających электронов возникало лазерное излучение (509 нм). При атмосферном давлении генерация в ПМ наблюдалась в каналах разряда при движении стримера от одной поверхности ПМ к противоположной. В этом случае при увеличении напряженности электрического поля излучение последовательно возникало на трех спектральных линиях 509, 480 и 469 нм. Рассмотрены возможные причины наблюдаемых явлений.*

**Ключевые слова:** газовый диод, полупроводники, наносекундный разряд, лазерная генерация.

Газовый диод (ГД) представляет собой отрезок коаксиальной камеры с электродами. Камера согласована с высоковольтным генератором ( $\leq 250$  кВ) ультракоротких импульсов  $(0.3 - 1) \cdot 10^{-9}$  с, под действием которых происходит пробой промежутка. В процессе разряда в ГД возникает ряд физических явлений, представляющих как научный, так и практический интерес. К ним относятся возникновение рентгеновского, оптического и сильного электромагнитного излучения в UWB диапазоне ( $10^{10} - 10^{11}$  Гц). Кроме того, в широком диапазоне давлений от форвакуума до атмосферного наблюдается пучок ускоренных электронов. Нами исследуется возможность применения ГД

---

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Россия 119991, Москва, Ленинский пр. 53.

для формирования ультракоротких импульсов ( $10^{-10} - 10^{-11}$  с) лазерного излучения, возникающего под действием перечисленных факторов в полупроводниковой мишени (ПМ), расположенной между электродами ГД, [1–6].

Устройство ГД с ПМ приведено на рис. 1. Передающая линия 1 согласована с волновым сопротивлением камеры 2. Катодный электрод 3 выполнен из графита, стальной анодный электрод 4 может перемещаться относительно подложки 5 на расстояние до 1 см. Конструкция ГД предусматривает возможность изменения давления газа в камере 2 от  $10^{-2}$  торр до атмосферного. Подробное описание устройства приведено в работах [1–4]. Применялись два типа ПМ1 и ПМ2, изготовленных из тройного прямозонного полупроводникового соединения  $Cd_xZn_{1-x}S$ , выращенного методом пересублимации из газовой фазы [7]. ПМ1 (на рис. 1 не показана) состоит из тонкой (15–30 мкм) монокристаллической пластины, на плоскости которой нанесены отражающие покрытия, образующие оптический резонатор. Пластина эпоксидным клеем закреплена на сапфировой подложке. ПМ1 устанавливалась в ГД после стального анода 4 с диаметром отверстия 1 мм и диафрагмы, закрытой фольгой. ПМ2 состоит из плоскопараллельной полупроводниковой пластины 6 толщиной 1 мм, закрепленной на подложке 5 из органического стекла с помощью тонкой прослойки 7 из эпоксидного клея. В центре подложки 5, с целью усиления напряженности электрического поля, имеется отверстие диаметром 1–3 мм [4]. На электрод 3 подавались импульсы амплитудой до 200 кВ и длительностью 0.5–1 нс. Исследования проводились в диапазоне давлений в камере 0.1–2 торр и 740–760 торр (атмосферное). Полный ток через диод  $I_0 = I_e + I_g$ , где  $I_e$  – ток электронной эмиссии,  $I_g$  – ток газового разряда. При  $p = 0.1 - 1$  торр максимальная плотность тока  $I_e$  на ПМ достигала  $1 \text{ кАсм}^{-2}$ . В случае  $p = 760$  торр  $I_e \ll I_g$ . Таким образом, в первом случае основное воздействие на ПМ определялось током электронного пучка, а во втором газовым разрядом. Напряжение и ток электронного пучка измерялись широкополосными датчиками, установленными в передающей линии 1 и на выходе ГД [2]. Форма светового импульса фиксировалась широкополосным фотоприемником ФП-70S с волоконно-оптическим входом и переходной характеристикой  $\sim 100$  пс. Спектральные характеристики регистрировались мини спектрометром FSD-8 с разрешением  $\sim 1$  нм. Энергия излучения измерялась прибором J3S10.. с минимальной чувствительностью  $10^{-12}$  Дж. Для регистрации спектральных характеристик и мощности излучения применялась специально разработанная волоконно-оптическая система [4]. В случае  $p = 0.1$  торр генерация лазерного излучения возникала в мишени ПМ1 при плотности тока электронного пучка  $j_e \sim 100 \text{ Асм}^{-2}$  и  $E_e = 10^5$  кэВ. Максималь-

ная мощность излучения достигала 2 кВт при длительности импульса по полуширине  $t_p = 250$  пс (рис. 2(а)). Полуширина спектра излучения ПМ1 при переходе в режим лазерного излучения уменьшалась от 20 до 2 нм (рис. 3(а, б)). С увеличением давления длительность и амплитуда импульса излучения ПМ1 уменьшались (рис. 2(а, б)) и при  $p = 2.5$  торр генерация лазерного излучения прекращалась. В этом случае ПМ1 заменялась на ПМ2 (рис. 1) и эксперимент проводился при атмосферном давлении ( $p = 740 - 760$  торр). При уменьшении расстояния между ПМ2 и анодом в местах наибольшей напряженности электрического поля по периметру отверстия в диэлектрической подложке 5 в полупроводниковой пластине 6 возникала генерация лазерного излучения. Число генерирующих точек и энергия излучения возрастали с уменьшением расстояния катод-анод, что наблюдалось и ранее [6]. Минимальный диаметр точки на пороге генерации равнялся  $\sim 10$  мкм. С увеличением напряженности электрического поля число излучающих точек увеличивалось, и они образовывали генерирующие области диаметром 100–200 мкм. Энергия излучения одной точки, измеренная с помощью прибора J3S10 и волоконно-оптической системы, специально разработанной для этой цели [5], составляла 1–3 нДж. Впервые (рис. 3(в)) на ПМ2 из тройного соединения  $Cd_xZn_{1-x}S$  при увеличении напряженности электрического поля наблюдался эффект последовательной генерации на трех длинах волн ( $\lambda = 469, 480, 509$  нм).

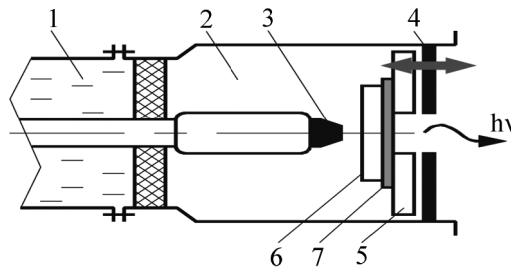


Рис. 1: 1 – передающая линия, 2 – камера ГД, 3, 4 – катодный и анодный электроды, 5 – диэлектрическая подложка, 6 – полупроводниковая пластина из  $Cd_xZn_{1-x}S$ , 7 – диэлектрическая прослойка.

Предварительный анализ результатов показал:

1. В плазме ГД с ПМ в широком диапазоне давлений (в нашем случае  $10^{-1} - 750$  торр) одновременно существуют ток ускоренных убегających электронов  $I_e$  (УЭ) и ток газового разряда  $I_g$ , что соответствует представлениям о наносекундных газовых разрядах [8–10].

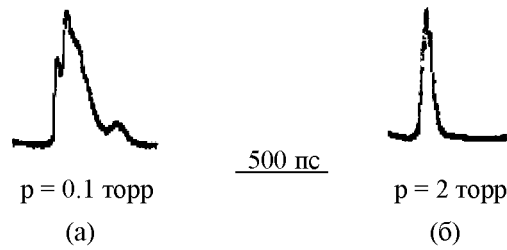


Рис. 2: Форма импульса света в режиме лазерного излучения ПМ1 при давлении воздуха в ГД 0.1 и 2 торр.

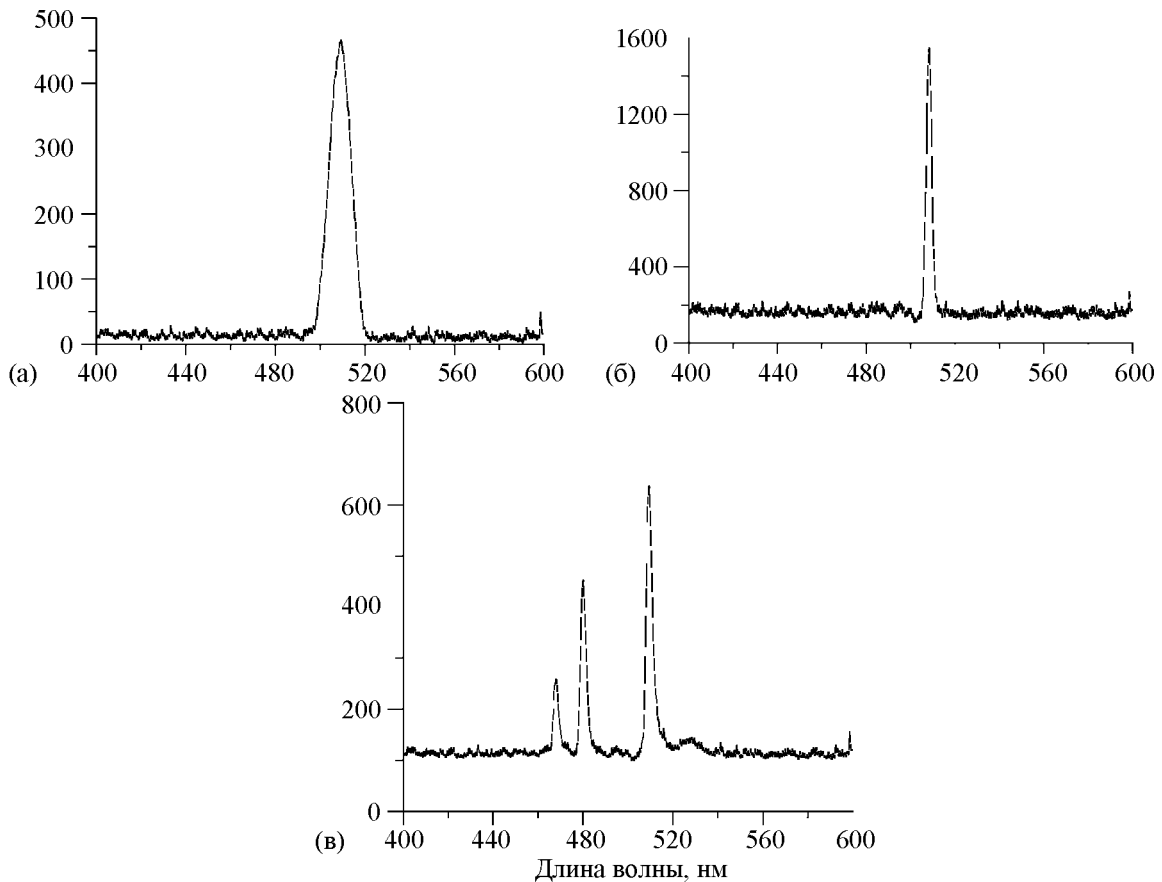


Рис. 3: Спектр люминесценции (а) и спектр генерации (б) ПМ1,  $p = 1$  торр. Спектр генерации (в) ПМ2 при атмосферном давлении.

2. При давлениях  $p = (10^{-1} - 2.5)$  торр (ПМ1) генерация (509 нм) возникала под действием тока  $I_e$ . При превышении порогового значения тока  $I_{e,thr}$  наблюдалось резкое сужение спектра и увеличение мощности излучения (рис. 2(а, б)).

3. При давлениях  $p > 2.5$  торр в результате уменьшения длительности и амплитуды  $I_e$  генерация лазерного излучения ПМ1 прекращалась.

4. Последовательную генерацию лазерного излучения ПМ2 на трех спектральных линиях 509, 480 и 469 нм можно объяснить следующим образом. После пробоя промежутка катод-ПМ2 происходит быстрый ( $\sim 3 \cdot 10^{-10}$  с) заряд емкости, образованной полупроводниковой пластиной, с последующим образованием стримерного разряда, распространяющегося со скоростью  $5 \cdot 10^8 - 10^9$  см·с<sup>-1</sup> от одной плоскости пластины к другой. В этом случае в головке стримера возникают условия для генерации лазерного излучения [11]. Излучение на трех длинах волн соответствует изменению состава полупроводниковой пластины  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$  в пределах значения  $x = 0.7 - 1$  [12] и может быть объяснено неоднородностью твердого раствора полупроводниковой пластины. Заметим, что в случае возбуждения только электронным пучком генерация лазерного излучения наблюдалась только на линии 509 нм (рис. 3(б)).

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние УЭ на генерацию ПМ оказывают в диапазоне давлений до 2-2.5 Торр. При дальнейшем повышении давления вплоть до атмосферного основной механизм генерации связан с пробоем газового промежутка и быстрым зарядом ПМ с последующим образованием стримерного пробоя. Роль УЭ в этом случае может сводиться к предыонизации области ПМ, в которой затем развивается стримерный разряд.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ N 09-08-00371-а и N 10-08-01219-а.

Авторы благодарны сотрудникам Института электрофизики УрО РАН С. Шунайлову и А. Реутовой за существенную помощь при проведении экспериментов.

#### 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] А. С. Насибов, К. В. Бережной, А. Г. Реутова и др., *ПТЭ* N 1, 75 (2009).
- [3] К. В. Бережной, М. Б. Бочкарев, А. С. Насибов и др., *ПТЭ* N 2, 124 (2010).
- [4] К. В. Бережной, А. С. Насибов, А. Г. Реутова и др., Патент на изобретение N 2393602 (2010).
- [5] А. С. Насибов, К. В. Бережной, М. Б. Бочкарев и др., в: Сборник трудов конференции “Лазеры. Измерения. Информация 2010”, Санкт-Петербург (СПбПУ, 2010), т. 1, с. 3.
- [6] К. В. Бережной, А. С. Насибов, П. В. Шапкин и др., *Квантовая электроника* **38**(9), 829 (2008).
- [7] Ю. В. Карстелин, В. Г. Тихонов, П. В. Шапкин, *Труды ФИАН* **221**, 345 (1996).
- [8] Г. А. Месяц, С. Д. Коровин, К. А. Шарыпов и др., *Письма в ЖТФ* **32**(1), 36 (2006).

- [9] Е. Х. Бакшт, М. И. Ломаев, Д. В. Рыбка и др., ЖТФ **78**(12), 29 (2008).
- [10] Л. П. Бабич, Т. В. Лойко, В. А. Цукерман, УФН **160**(7), 50 (1990).
- [11] Н. Г. Басов, А. Г. Молчанов, А. С. Насибов и др., ЖЭТФ **70**(5), 1751 (1976).
- [12] Н. Н. Берченко, В. Е. Кревс, В. Г. Средин, *Полупроводниковые твердые растворы и их применение* (М., Воениздат, 1982), с. 62.

Поступила в редакцию 14 октября 2010 г.