

## РАССЛОЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ И ГОЛУБАЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ОБЛАСТИ СТАТИЧЕСКОГО ДОМЕНА GaAs

*Б.С.Кернер, В.В.Осипов, М.Т.Романко, В.Ф.Синкевич*

Экспериментально исследованы пленки  $n$ -GaAs, в которых одновременно образуются статический домен у анода и бегущий от катода домен Ганна. Показано, что однородно генерируемая бегущим доменом электронно-дырочная плазма расслаивается в области статического домена, где наблюдается сильно неоднородное коротковолновое излучение, в том числе светло-голубые точки размера  $\sim 1 - 2$  мкм, расположенные друг от друга на расстоянии  $\sim 4$  мкм.

1. При разогреве в GaAs электронов в электрическом поле возникает бегущий домен Ганна, поле в котором тем больше, чем выше концентрация равновесных электронов  $n_0$ <sup>1</sup>. При больших  $n_0$  в домене происходит интенсивная межзонная ударная ионизация, в результате которой образец практически однородно заполняется электронно-дырочной плазмой (ЭДП)<sup>1</sup>. В данном сообщении исследовались совершенные пленки GaAs различной толщины  $w$  с  $n_0 \approx 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, выращенные на полужолирующей подложке из GaAs (рис. 1). Исследования проводились при температуре кристалла  $T_0 \approx 300$  К. В "толстых" пленках толщиной  $w > 0,5$  мкм при напряжении  $U > 11$  В возникал бегущий домен Ганна с частотой  $f \approx 3 \cdot 10^9$  Гц, который приводил к образованию практически однородно распределенной ЭДП. Наличие ЭДП и ее распределение по образцу устанавливалось при исследовании люминесценции с пространственным разрешением 1 мкм с помощью охлаждаемого ФЭУ-79. Наблюдалось краевое излучение с широким спектром, интенсивность которого практически равномерно распределена по образцу, точнее, излучение однородно вдоль оси  $y$  (рис. 1) и слабо нарастает (не более, чем в два раза) от катода к аноду за счет возрастания амплитуды домена Ганна, зарождающегося у катода. В тонкой пленке толщиной  $w < 0,3$  мкм, как и следовало ожидать<sup>2</sup>, образовывался не бегущий, а статический домен. Излучательная рекомбинация в таких пленках не наблюдалась вплоть до напряжения ( $U \approx 25$  В) возникновения лавинного пробоя у анода.

2. В пленках промежуточной толщины ( $0,3 \text{ мкм} < w < 0,5 \text{ мкм}$ ) у анода образуется статический домен, а со стороны катода периодически с частотой  $f \approx 3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$  генерируется бегущий домен<sup>3</sup>. Образование при  $U > 11 \text{ В}$  бегущего домена приводит к скачкообразному возникновению в статическом домене локальных областей горячей электролюминесценции размером  $l \approx 1 \text{ мкм}$ , расположенных друг от друга на расстоянии  $L \approx 4 \text{ мкм}$ . Эти области наблюдаются в оптическом микроскопе в виде ярко светящихся светло-голубых точек. Изучение люминесценции показало, что в направлении оси  $y$ , перпендикулярном линиям тока, вне статического домена излучение распределено однородно, а в области домена имеет резко выраженные пики (рис. 2). Распределение интегральной интенсивности излучения качественно совпадает с распределением коротковолнового (голубого) света, наблюдаемого через полосовой фильтр, имеющий область прозрачности  $0,46 - 0,48 \text{ мкм}$ .

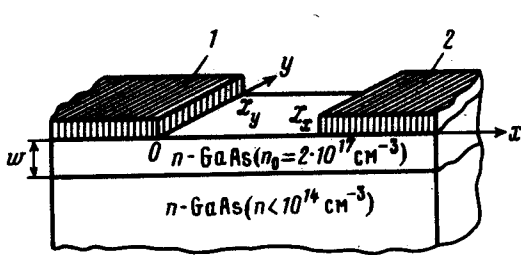


Рис. 1. Структура исследованных образцов: (1 - анод, 2 - катод;  $L_x = 25 \text{ мкм}$ ,  $L_y = 15 \text{ мкм}$ )

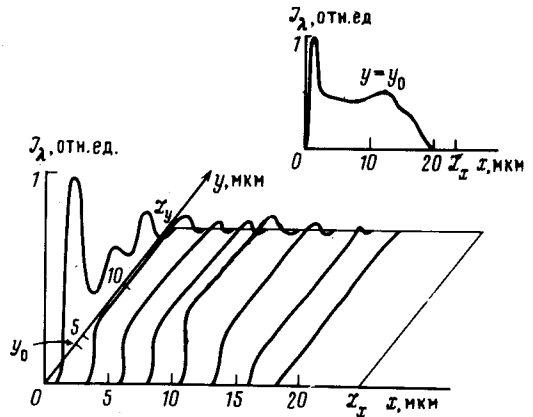


Рис. 2. Распределение излучения  $J_\lambda(x, y)$  ЭДП по площади пленки при  $U = 11,5 \text{ В}$ ,  $L_x = 25 \text{ мкм}$ ,  $L_y = 15 \text{ мкм}$ ,  $w = 0,35 \text{ мкм}$ . Оси координат коррелируют с изображенными на рис. 1. На верхней вставке к рисунку показано распределение излучения  $J_\lambda(x)$  в сечении  $y_0 = 4 \text{ мкм}$

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что генерируемая бегущим доменом ЭДП, разогреваясь в области статического домена, расслаивается на горячие сгустки. При этом коротковолновое излучение в сгустках отвечает рекомбинации дырок с горячими электронами из верхней долины GaAs. Для дополнительного подтверждения этих выводов были исследованы пленки, в которых кроме анодного и катодного антизапорных контактов был изготовлен дополнительный узкий электрод (шириной  $2 \text{ мкм}$ ) в виде барьера Шоттки, расположенный на расстоянии  $3 \text{ мкм}$  от катода. Наблюдаемая ранее картина расслаивающейся ЭДП при подаче отрицательного смещения на этот электрод не менялась вплоть до  $U_3 = U_{cr} \approx 4 \text{ В}$ . При  $U_3 > U_{cr}$  наблюдался пороговый эффект: ганновская генерация исчезала, т. е. бегущий домен пропал, и вместе с ним скачкообразно исчезала люминесценция, в том числе и в виде голубых точек в области статического домена у анода. Это однозначно доказывает, что при  $U < 25 \text{ В}$  в статическом домене ударная ионизация отсутствует, а источником генерации ЭДП является ударная ионизация носителей в бегущем домене. При  $U_3 > U_{cr}$  светящиеся сгустки в статическом домене возникают только при напряжениях на структуре  $U > U_s \approx 25 \text{ В}$  за счет ударной ионизации носителей у анода. При этом картина расслаивания ЭДП аналогична наблюдавшейся ранее в тонких пленках GaAs толщиной  $w = 0,25 \text{ мкм}$ <sup>4</sup>.

3. Из анализа ВАХ и интенсивности излучения образца следует, что средняя концентрация ЭДП  $n \gtrsim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и по оценкам подвижность носителей определяется электронно-дыроч-

ным рассеянием. Наблюдаемую по люминесценции картину расслоения ЭДП (рис. 2) можно объяснить на основе теории, развитой в работе <sup>5</sup>, в которой показано, что ЭДП высокой плотности расслаивается перпендикулярно линиям тока, когда выполнены условия  $L \gg l$

$$3/2 + s > 0, \quad (1)$$

а ее эффективная температура  $T > T_0(5 + 2s)(3 + 2s)^{-1}$ . Здесь  $s = \partial \ln \tau_\epsilon / \partial \ln T$ ;  $\tau_\epsilon$ ,  $l$ ,  $L$  — время релаксации энергии, длина остывания и диффузионная длина горячих носителей.

Вне статического домена электроны находятся в нижней  $\Gamma$ -долине GaAs и при увеличении электрического поля они переходят в вышележащие  $X$ - и  $L$ -долины. Поэтому  $\tau_\epsilon$  этих электронов является резко падающей функцией энергии и для них условие (1) оказывается невыполненным. Иная ситуация реализуется при разогреве электронов в статическом домене. В нем электрическое поле  $E > 10 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$  и большинство электронов находится в наиболее высокой долине. Их кинетическая энергия рассеивается при взаимодействии с оптическими фононами и при переходах между эквивалентными долинами. При таких механизмах рассеяния энергии величина  $\tau_\epsilon$  с ростом  $T$  если и падает, то по-видимому, не быстрее, чем  $T^{-1/2}$ , т. е. для горячих электронов в верхней долине условие (1) оказывается выполненным. Поэтому практически однородное распределение ЭДП вне домена устойчиво, а в области статического домена ЭДП расслаивается перпендикулярно линиям тока. При этом, согласно теории <sup>5</sup>, расстояние между максимумами в распределении  $T(y)$  в ЭДП (рис. 2) совпадает по порядку величины со значением  $L$ , которое в GaAs с  $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$  составляет несколько микрон, причем при  $T_0 \approx 300 \text{ К}$  величина  $L \gg l$ . Численные исследования задачи, рассмотренной в <sup>5</sup>, показали, что максимальные значения температуры носителей  $T_{max}$  при расслоении ЭДП могут ограничиваться процессом ударной межзонной ионизации. При этом, несмотря на то, что  $T_{max}$  в слое оказывается больше  $10^3 \text{ К}$ , концентрация носителей в нем падает лишь на 20 — 30% по отношению к среднему значению концентрации электронов, находящихся в верхней долине GaAs. Эти результаты объясняют возникновение локальных областей светло-голубого свечения в области статического домена  $n$ -GaAs. В исследованных в п. 2 пленках бегущий домен возникал при  $U \approx 11 \text{ В}$ , когда ширина статического домена составляла  $\sim 3 - 4 \text{ мкм}$ . Расстояние между образующимися при расслоении пиками также составляло величину  $\sim 4 \text{ мкм}$ . Поэтому при расслоении ЭДП в оптическом микроскопе наблюдаются светло-голубые области в виде точек у анода, где находится статический домен.

4. Бегущий домен сильного электрического поля в рассматриваемых экспериментах (п.2) играет роль лишь источника генерации ЭДП по всей длине пленки  $n$ -GaAs, в том числе и в области статического домена. Изложенные выше результаты позволяют сделать вывод, что при фотогенерации или инжекции (из дополнительного контакта) дырок в пленках толщиной  $w < 0,3 \text{ мкм}$ , в которых образуется только статический домен, также может наблюдаться расслоение ЭДП и возникновение локальных областей голубой электролюминесценции.

#### Литература

1. Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М.: "Сов. радио", 1975.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М.: Наука, 1972.
3. Кернер Б.С., Козлов Н.А., Романко М.Т., Синкевич В.Ф. Физические явления в приборах электронной и лазерной техники. М.: изд. МФТИ, 1985, с. 80.
4. Кернер Б.С., Синкевич В.Ф. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 359.
5. Кернер Б.С., Осипов В.В. ФТП, 1979, 13, 891.