

РАССЛОЕНИЕ ИНЖЕКТИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В ПЛЕНКАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Ващенко В. А., Кернер Б. С., Осипов В. В., Синкевич В. Ф.

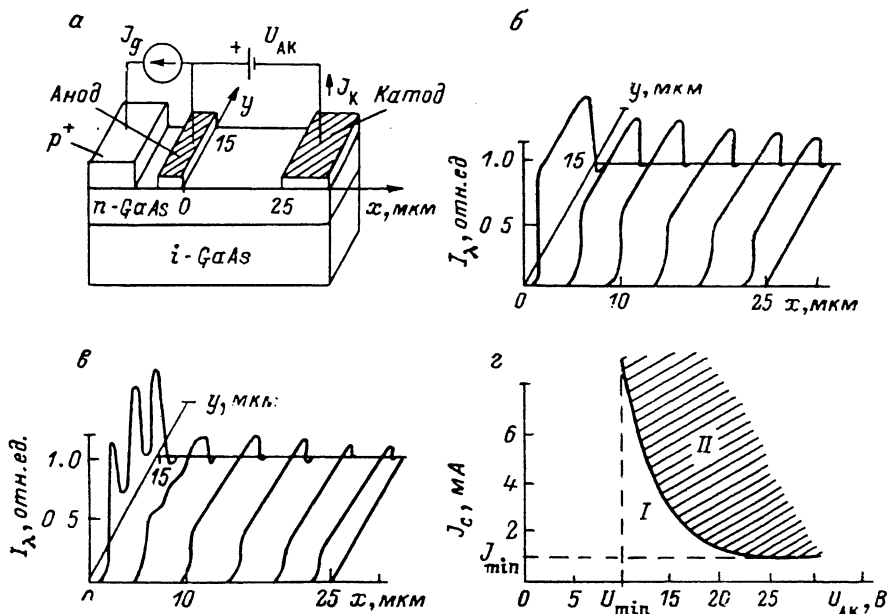
Экспериментально обнаружено и исследовано расслоение инжектированной электронно-дырочной плазмы (ЭДП) высокой плотности в пленках GaAs. Выяснено, что расслоение ЭДП происходит при электрических полях, на несколько порядков меньших порогового поля ударной ионизации GaAs. Установлено, что ЭДП расслаивается лишь в том случае, когда ток инжекции (т. е. концентрация ЭДП в пленке GaAs) и электрическое поле превосходят определенные критические значения. Найдена зависимость критического значения для расслоения ЭДП инжекционного тока от падения напряжения на структуре. Изучена эволюция светло-голубых светящихся точек, образующихся в пленке GaAs при расслоении горячей ЭДП, от тока инжекции и падения напряжения на структуре.

В [1] при исследовании тонких пленок GaAs при комнатных температурах было обнаружено расслоение электронно-дырочной плазмы (ЭДП), образующейся в результате ударной ионизации у одного из контактов. Расслоение ЭДП проявлялось в образовании у анода в области статического домена светло-голубых точек размером 10^{-4} см. Такой же результат наблюдался и при исследовании более толстых пленок GaAs, в которых ЭДП практически однородно генерировалась быстро бегущим доменом Ганна [2]. В обоих исследованных случаях [1, 2] ЭДП генерировалась за счет межзонной ударной ионизации. Поэтому может возникнуть вопрос, не является ли межзонная ударная ионизация причиной образования светящихся точек. В данной работе на основе изучения разогрева инжектированных носителей показано, что, когда их концентрация достаточно высока, происходит расслоение ЭДП в практически однородном электрическом поле, величина которого на несколько порядков меньше порогового поля ударной ионизации GaAs.

1. Исследовалась структура (см. рисунок, а), изготовленная на основе тонких эпитаксиальных пленок GaAs n - и p^+ -типа, выращенных последовательно на подложке высокоомного GaAs. В качестве активной области структуры использовались пленки n -GaAs толщиной $2.5 \cdot 10^{-5}$ см с концентрацией электронов $n_0 = 10^{14}$ и 10^{17} см $^{-3}$. Инжектирующий контакт представлял собой p^+ -область с концентрацией дырок $\sim 10^{19}$ см $^{-3}$ и толщиной $2 \cdot 10^{-5}$ см. Омические n^+ -контакты изготавливались напылением и последующим вжиганием пленок Au—Ge. Расстояние между n^+ -контактами (анодом и катодом) составляло $L = 2.5 \cdot 10^{-3}$ см, а между p^+ -областью и ближайшим n^+ -контактом (анодом) не превышало $2 \cdot 10^{-4}$ см. Пространственное распределение концентрации дырок изучалось при комнатных температурах по распределению и спектральному составу рекомбинационного излучения по площади пленки. Пространственное разрешение установки для исследования рекомбинационного излучения составляло $\sim 10^{-4}$ см. Интегральная интенсивность излучения, приведенная на рисунке, б, в, измерялась при помощи фотоумножителя ФЭУ-79 без нормировки на его спектральную чувствительность. Иными словами, в показанных на рисунке, б, в картинах пространственного распределения люминесценции учиты-

аются изменения не только интенсивности, но и спектрального состава излучения.

2. Из эксперимента следует, что распределение инжектируемых носителей существенно зависит от плотности инжекционного тока J_g и напряжения между анодом и катодом U_{AK} (см. рисунок). При $J_g < J_{min} \approx 1$ мА расслоения рекомбинационного излучения не наблюдалось. В этом случае при малых напряжениях U_{AK} наблюдается длинноволновое краевое излучение GaAs, интенсивность которого резко падает от анода к катоду. С ростом U_{AK} за счет дрейфа инжектируемых дырок в электрическом поле к катоду спад интенсивности рекомбинационного излучения становится все более плавным. При $U_{AK} \approx 7.5$ В, т. е. при электрическом поле $3 \cdot 10^3$ В/см, время пролета дырок между анодом и катодом



Исследуемая структура (а) и распределение по ее площади интенсивности рекомбинационного излучения при инжекционном токе J_g ниже критического для расслоения ЭДП значения тока J_c (б) и при $J_g > J_c$ (в).

Зависимость величины J_c от напряжения U_{AK} между анодом и катодом показана на д, где область I отвечает однородному распределению ЭДП (б), а заштрихованная область II — расслоившейся ЭДП (в):

$\tau_{np} \approx \mathcal{L}^2 / \mu U_{AK} \ll 10^{-9}$ с (μ — подвижность дырок), а распределение излучения оказывается практически однородным по площади. При этом ток катода J_k совпадает с током инжекции J_g (см. рисунок, а) и не изменяется вплоть до $U_{AK} \approx 25-30$ В. При $U_{AK} \geq 10$ В вблизи анода образуется статический домен, который наблюдается по распределению электрического поля (в растровом электронном микроскопе) и по коротковолновому смещению спектра рекомбинационного излучения в прианодной области структуры.

Приведенные результаты относятся к структурам, у которых равновесная концентрация электронов в активной области (пленки n-типа; см. рисунок, а) составляла 10^{14} и 10^{17} см⁻³. Различие состояло лишь в том, что в структурах с высокоомной пленкой ($n_0 \approx 10^{14}$ см⁻³) благодаря инжекции носителей осуществлялась сильная модуляция проводимости пленки n-типа. Модуляция проявлялась в сильном изменении проводимости участка пленки между анодом и катодом. По оценкам, демаркационному току $J_g = J_{min} \approx 1$ мА соответствует уровень инжекции, при котором концентрация неравновесных носителей в пленке n-типа составляет $p = n \approx 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Иными словами, при токах $J_g < J_{min}$ для высокоомных структур осуществляется высокий уровень, а для низкоомных — низкий уровень инжекции. Это непосредственно наблюдается по виду их ВАХ.

3. При $J_g > J_{\min} \approx 1$ мА концентрация инжектированных носителей в пленках n -типа превышает 10^{17} см $^{-3}$, т. е. осуществляется высокий уровень инжекции даже для низкоомных слоев с $n_0 \approx 10^{17}$ см $^{-3}$. Картина распределения рекомбинационного излучения такой плотной инжектированной ЭДП при некоторых значениях U_{AK} меняется с практически однородной вдоль оси y (см. рисунок, б) на резко неоднородную (в). Величина U_{AK} , при которой это реализуется, зависит от величины инжекционного тока J_g (з). При этом существует $U_{AK} = U_{\min}$, ниже которого пространственное распределение люминесценции вдоль оси y однородно (з). При $U_{AK} \geq 7.5$ В у анода образуется статический домен, а при $U_{AK} > U_{\min} \approx 10$ В в области этого домена происходит расслоение ЭДП (в).

При $U_{AK} > U_{\min}$, когда у анода сформирован статический домен, распределение рекомбинационного излучения существенно зависит от величины тока инжекции J_g . При малых токах инжекции $J_g < J_{\min}$ (з) распределение краевого излучения, а следовательно, и инжектированных носителей в области между анодом и катодом практически однородно. При этом электроны в области статического домена у анода разогреваются, о чем свидетельствует коротковолновое излучение, наблюдаемое в прианодной области структуры. Это же проявляется и в показаниях используемого для регистрации ФЭУ-79 (б), фоточувствительность которого вблизи порога его чувствительности (0.8 мкм) резко увеличивается при появлении в спектре люминесценции коротковолнового излучения. При токе инжекции J_g , превышающем пороговое значение J_c , величина которого зависит от напряжения U_{AK} (з), происходит расслоение горячих носителей в области статического домена (в). В оптическом микроскопе этот эффект непосредственно проявляется в образовании светло-голубых квазипериодически расположенных точек размером $\sim 10^{-4}$ см в прианодной области структуры. При дальнейшем увеличении инжекционного тока J_g число точек увеличивается. В зависимости от параметров и качества активного слоя осуществляется мягкий или скачкообразный режим появления новых светящихся точек. В совершенных структурах происходит последовательное удвоение числа точек [уменьшение их периода вдоль оси y (см. рисунок, в)]. Напротив, в неоднородных образцах число точек увеличивается на единицу. При этом появление новых точек с ростом инжекционного тока J_g происходит в различных участках прианодной области.

При $J_g > J_{\min}$ увеличение напряжения U_{AK} сопровождается появлением все более коротковолнового «хвоста» в спектре рекомбинационного излучения. При $U_{AK} > 20-25$ В происходит необратимое разрушение активной пленки структуры. При этом, так же как и при пробое тонких пленок GaAs [1], в местах светящихся точек исследуемой структуры образуются капельки жидкого галлия размером порядка нескольких микрометров.

4. Установленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что, как и предсказывалось в [1, 2], расслоение ЭДП в пленках GaAs не связано с межзонной ударной ионизацией носителей. При этом, как показывает анализ, проведенный в [2], все результаты эксперимента удается объяснить на основе теории расслоения ЭДП высокой плотности [3]. Действительно, из эксперимента следует, что расслоение наблюдается, когда осуществляется высокий уровень инжекции, а концентрация неравновесных носителей $n=p \approx 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. При таких высоких плотностях ЭДП при комнатных температурах подвижность носителей определяется столкновениями движущихся в электрическом поле навстречу друг другу электронов и дырок. При этом именно в области статического домена [2] выполняются условия, при которых разогретая ЭДП расслаивается перпендикулярно линиям тока [3], и в ней, согласно теории [3, 4], должны образовываться области высокой температуры и несколько пониженной концентрации. Расстояние между такими областями, согласно теории, ограничено величиной порядка длины биполярной диффузии неравновесных носителей L . В рассматриваемых структурах при высоких уровнях инжекции L составляет несколько микрометров. На таком же расстоянии находятся и образующиеся светящиеся точки (см. рисунок, в).

Образование капелек жидкого галлия в светящихся точках при сильном разогреве ЭДП можно объяснить на основе теории, развитой в [5]. Действи-

тельно, согласно [5], горячая люминесценция GaAs сопровождается интенсивной генерацией оптических фононов. Длина пробега таких фононов мала, поэтому они генерируются локально лишь в светящихся точках, т. е. в областях, где электроны и дырки сильно разогреты. Такая генерация оптических фононов в конечном итоге может приводить к разрушению решетки — испарению As и образованию капелек Ga в местах сильного разогрева ЭДП (в светящихся точках структуры).

Список литературы

- [1] Кернер Б. С., Синкевич В. Ф. // Письма ЖЭТФ. 1982. Т. 36 В. 10. С. 359—362.
- [2] Кернер Б. С., Осипов В. В., Романко М. Т., Синкевич В. Ф. // Письма ЖЭТФ. 1986. Т. 44 В. 2. С. 77—79.
- [3] Кернер Б. С., Осипов В. В. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 5. С. 891—896.
- [4] Кернер Б. С., Осипов В. В. // Нелинейные волны: динамика и эволюция. М., 1989. С. 127—152.
- [5] Кумеков С. Е., Перель В. И. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94 В. 1. С. 346—356.

Получена 15.03.1989
Принята к печати 21.03.1989
