

# О ВОЗМОЖНОСТИ БЫСТРОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПЛОТНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

И.В. Грехов, В.М. Ефанов

Для повышения мощности полупроводниковых лазеров необходимо уметь создавать в полупроводнике большие объемы плотной электронно-дырочной плазмы с инверсной заселенностью энергетических уровней, причем время создания плазмы во всем объеме должно быть меньше излучательного времени жизни носителей. Таким образом, скорость возбуждения активной области толщиной  $L$  должна быть  $v \geq L/\tau_h$ , где  $\tau_h$  - излучательное время жизни. Для *GaAs*  $\tau_h \approx 10^{-10}$  с, и, например, при  $L = 10^{-2}$  см  $v \geq 10^8$  с, что на порядок больше предельной (насыщенной) скорости движения носителей заряда. В настоящее время известен только один физический процесс в полупроводниках, способный обеспечить формирование плазмы с такой скоростью - это ударно-ионизационные волны, возбуждаемые импульсами перенапряжения, [1, 2].

Принципиальным обстоятельством является также то, что этот процесс, как следует ожидать, может обеспечить довольно однородное заполнение плазмой рабочего объема,<sup>1</sup> в отличие от исследованных [3-5] процессов стримерного разряда в полупроводниках, сопровождающихся лазерным излучением.

В работе [2] впервые была показана возможность сверхбыстрого переключения *GaAs* диода, однако уровень концентрации плазмы в базе диода после переключения оставался явно недостаточным для получения инверсной заселенности энергетических уровней. Плотность тока через диод в этих экспериментах достигала  $10^4$  А/см<sup>2</sup>, а средние поля примерно  $10^4$  В/см, что соответствует средней концентрации носителей заряда менее  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование возможности получения в *GaAs* диодах после сверхбыстрого переключения концентрации электронно-дырочной плазмы, достаточной для инверсной заселенности энергетических уровней.

Концентрация плазмы, образующейся после пробега ударно-ионизационной волны, растет с возрастанием скорости подъема и ампли-

<sup>1</sup> Так, из проведенных нами экспериментов на кремниевых диодах следует, что остаточное напряжение на приборе после переключения примерно обратно пропорционально его площади, а сама величина остаточного напряжения согласуется со средней концентрацией плазмы в базе диода, оцениваемой из независимого эксперимента по величине заряда, выносимого обратным током из диода после переключения.

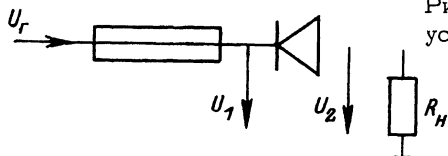


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

туды напряжения на диоде перед переключением, поэтому была сконструирована установка, позволяющая получать скорость подъема напряжения до  $3 \cdot 10^{13}$  В/с при амплитуде до 5 кВ.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. По кабелю с волновым сопротивлением  $\rho = 50$  Ом импульс напряжения подавался на исследуемый образец, помещенный в разрыв коаксиальной линии. Конструкция держателя образца позволяла проводить измерения как при наличии согласующей нагрузки  $R_H = 50$  Ом (при этом одновременно измерялось напряжение на диоде  $U = U_1 - U_2$  и плотность тока через него  $j = U_2/R_H S$ , где  $S$  — площадь диода), так и при заземлении анода диода (при этом непосредственно измерялось напряжение на диоде  $U = U_1$ , а плотность тока после переключения диода  $j = 2U_0/\rho S$  так как эквивалентное сопротивление диода после переключения  $R_{э\kappa\beta} \ll \rho$ , где  $U_0$  — амплитуда падающей волны напряжения на согласованную нагрузку). Включение диода без согласующей нагрузки позволяло более точно измерять напряжение на диоде и вдвое увеличить плотность тока по сравнению со случаем включения согласующей нагрузки.

Временное разрешение регистрирующих трактов было  $5 \cdot 10^{-12}$  с. Измерения проводились на стробоскопическом осциллографе С7-13 с записью на самописце.

Импульсы напряжения формировались с помощью дрейфовых диодов с резким восстановлением напряжения (ДДРВ) [6] и кремниевых диодных обострителей (ДО) [1]. На согласованной нагрузке  $R_H = 50$  Ом импульсы напряжения имели следующие параметры: амплитуда  $\approx 5$  кВ, передний фронт  $\approx 150 \cdot 10^{-12}$  с, длительность импульса  $\approx 3 \cdot 10^{-9}$  с, частота повторения 50 Гц.

В экспериментах исследовались  $p^+p^0n^0n^+$  GaAs диоды, изготовленные по стандартной технологии [7], с толщиной высокоомной  $p^0n^0$  области  $W = 2 \cdot 10^{-2}$  см. Образцы прямоугольной формы имели площадь  $S = 6 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup> и получались методом скалывания.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2. Кривые (1, 1') соответствуют измерениям при наличии согласующей нагрузки при комнатной температуре. Как видно из этих осциллограмм, напряжение на диоде за время  $\approx 200 \cdot 10^{-12}$  с достигает значения в 5000 В, а затем за время  $\approx 70 \cdot 10^{-12}$  с уменьшается до  $U_{ост} = 300$  В. При этом средняя плотность тока через структуру достигает  $1.4 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>.

При использовании схемы с заземлением анода диода напряжение переключения и остаточное напряжение после переключения практически не менялись, плотность тока при этом достигала  $2.8 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>.

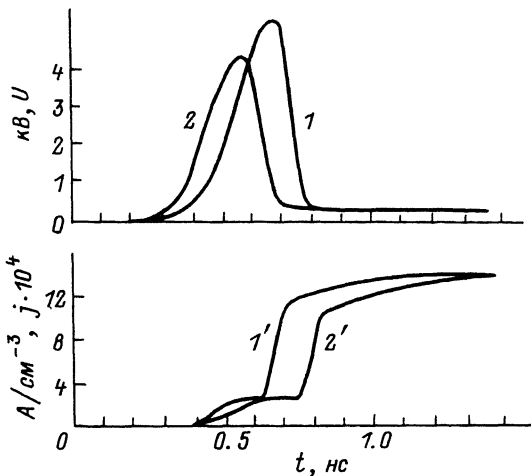


Рис. 2. Напряжение на диоде и ток через него при согласующей нагрузке  $R_H = 50 \text{ Ом}$ . Кривые 1, 1' - при комнатной температуре, кривые 2, 2' - при измерениях в жидком азоте.

Кривые (2, 2') на рис. 2 соответствуют измерениям при температуре жидкого азота. Как видно из этих осциллограмм, максимальное напряжение на диоде уменьшилось до 4000 В, а время переключения и плотность тока примерно соответствуют этим параметрам при комнатной температуре.

Из приведенных осциллограмм прежде всего следует, что достигнутые в эксперименте средние значения плотности тока через образец  $j = 2.8 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$  близки к плотности тока в канале стримерного лазера  $j \approx 10^6 \text{ А/см}^2$  [5]. Среднюю концентрацию неравновесной электронно-дырочной плазмы в диоде после переключения можно снизу оценить следующим образом.

Среднее значение электрического поля в базе  $\bar{E} = \frac{U_{ост}}{W} \approx 1.5 \times 10^4 \text{ В/см}$ , т.е. скорость электронов можно считать насыщенной  $v_s = 10^7 \text{ см/с}$ . Учитывая это, средняя концентрация плазмы в диоде после переключения  $\bar{n} = j/qv_s$ . При  $j = 2.8 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$   $\bar{n} \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . В сделанных оценках мы пренебрегли проводимостью дырок, так как их скорость при полях  $\approx 10^4 \text{ В/см}$  значительно меньше скорости электронов. Оценку концентрации  $n_{кр}$ , при которой наступает инверсия заселенности энергетических уровней, можно провести согласно [8], где этот параметр определялся как условие стимулированного излучения в TRAPATT-диоде.

$$n_{кр} \frac{\sqrt{2\pi^3 h^3}}{(m_p k T)^{3/2}} \approx \left( \frac{16}{9} \pi \right)^{1/3} \frac{m_n}{m_p}, \quad (1)$$

где  $\hbar$  - редуцированная постоянная Планка,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $m_n, m_p$  - эффективные массы электронов и дырок.

При комнатной температуре  $n_{кр} \approx 1.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а при  $T = 77^\circ\text{К}$   $n_{кр} = 1.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Таким образом, в наших экспериментах, по крайней мере при азотной температуре, средняя концентрация неравновесной плазмы  $\bar{n} \approx n_{кр}$ , что позволяет надеяться на возможность практической перспективы.

## Л и т е р а т у р а

- [1] Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф. - Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, в. 15, с. 950-953.
- [2] Алферов Ж.И., Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Корольков В.И., Степанова М.И. - Письма в ЖТФ, т. 13, №18, с. 1089.
- [3] Nicoll F.H. - Appl. Phys. Lett., 1973, v. 23, p. 465.
- [4] Басов Н.Г., Молчанов А.Г., Насибов А.С., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М. - Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, 19, с. 650.
- [5] Дубров В.Д., Исманов И., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М., Фролов В.А. Лазеры на  $Inl$  и  $GaAs$  возбуждаемые сильным электрическим полем. Препринт № 233, Москва, 1985.
- [6] Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендере С.В. - Письма в ЖТФ, 1983, в. 7, с. 435-439.
- [7] Алферов Ж.И., Бергман Л., Корольков В.И., Никитин В.Г. - ФТП, 1977, т. 11, в. 5, с. 842-898.
- [8] Шур М.С. - ФТП, 1974, т. 8, в. 5, с. 587-590.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию 6 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 23

12 декабря 1988 г.

## ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ II(VI) В ЖИДКОЙ ФАЗЕ

А.И. Гуревич, Ю.П. Донцов, В.Н. Косяков,  
Б.Б. Крынецкий, В.В. Ломоносов,  
И.В. Матвеев, С.М. Миронов, П.Е. Пискарев

Развитие лазерной технологии и создание широкого класса лазерных источников света открывает новые перспективы как для научных исследований, так и для промышленного использования лазерной фотохимии. Большой интерес представляет стимулирование светом