

ности сосуда. Как показал дополнительный анализ, приведенное в [1] решение соответствует тому, что такое условие ставится не на движущейся, а на недеформированной поверхности сосуда. Физически это соответствует недеформированной поверхности с отверстиями, через которые жидкость может втекать в сосуд и вытекать из него, причем модуляция скоростей этих потоков имеет вид бегущей по боковой поверхности волны. Как нам указал А.Е. Городецкий, граничные условия прилипания к деформированной поверхности, являвшейся до деформации цилиндрической, приводят к круговому движению жидкости как целого со скоростью, по-другому зависящей от вязкости жидкости.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Г а л ь п е р и н Ю.М., Г у р е в и ч В.Л. // Письма в ЖФТ. 1982. Т. 8. В. 18. С. 1123-1125.

Поступило в Редакцию
10 марта 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 9

12 мая 1989 г.

Об.3; 12

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ $p-i-n$ GaAs/AlGaAs ФОТОПРИЕМНИК, РАБОТАЮЩИЙ В ВЕНТИЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Д.М. Б у т у с о в, Г.Г. Г о ц а д з е,
В.Р. Л а р и о н о в, Б.С. Р ы в к и н,
Е.М. Т а н к л е в с к а я, Ф.Н. Т и м о ф е е в

В последнее время появилось значительное число работ, посвященных созданию и исследованию малоинерционных фотоприемников, на основе $p-i-n$ структур [1, 2] и диодов на барьере Шоттки [3, 4] с быстродействием лучше 50-100 пс. Эти приборы работают, как правило, с внешним источником постоянного смещения. Однако в ряде случаев важно иметь фотодиоды, способные работать без внешнего смещения (в вентильном режиме) [5]. При этом высокое быстродействие фотоприемников могло бы быть получено в случае, когда при нулевом смещении область объемного заряда целиком содержит в себе область поглощения света.

Настоящая работа посвящена созданию и исследованию быстродействующего $p-i-n$ фотодиода на основе GaAs/AlGaAs полупроводниковой гетероструктуры, работающего в вентильном режиме. Исходная структура (рис. 1, а) была получена методом жидкофазной эпитаксии. На структуре методом фотолитографии и последующего химического травления изготавливались мезы диаметром 60 мкм. На p^+ -GaAs контактном слое формировался кольцевой AuZn кон-

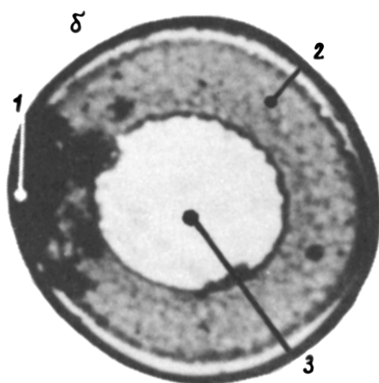
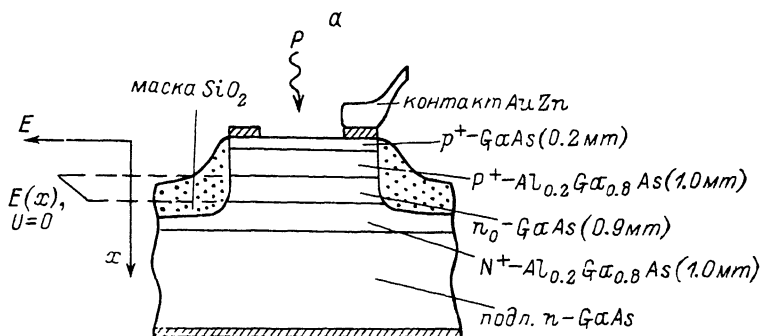


Рис. 1. а) Вид скола исследуемого фотоприемника, распределение электрического поля E в нем при отсутствии внешнего напряжения смещения. Собственная концентрация носителей заряда в n^0 -слое $n \approx 5-7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

б) Фотография меза-фотодиода, сделанная на электронном микроскопе *JSM-50A*. Диаметр мезы 60 мкм, диаметр светочувствительного „окна“ ≈ 30 мкм. 1 - 1 - проволочный контакт, 2 - кольцевой контакт, 3 - „окно“.

такт с диаметром светочувствительного окна ≈ 30 мкм (рис. 1, б). Исследование вольт-амперных характеристик показало, что пробой диода наступает при обратном напряжении смещения $U \approx -20$ В. Величина темнового тока, измеренного при $U = -10$ В, составила $\lesssim 1$ нА.

Концентрация носителей заряда в поглощающем n^0 -GaAs слое, измеренная вольт-емкостным методом, была $\approx 5-7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. В этом случае ширина области объемного заряда при нулевом смещении должна составить $w_0 \approx 1.3-1.5$ мкм [6]. Толщина поглощающего слоя $d = 0.9$ мкм была выбрана меньше w_0 так, чтобы электрическое поле встроенного p-n гетероперехода обеспечивало

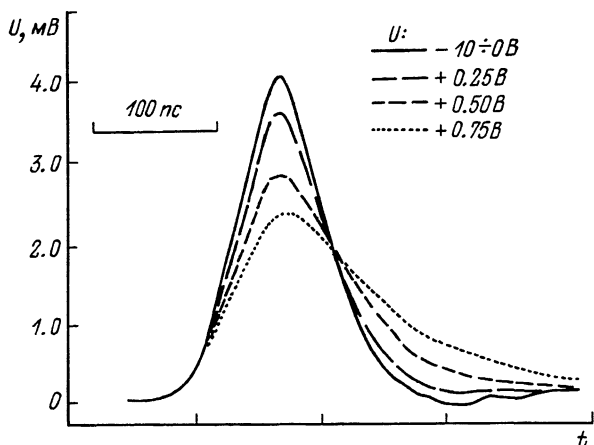


Рис. 2. Осциллограммы импульсов фототока при различных напряжениях смещения (знаком „-“ обозначено обратное смещение р-п перехода).

дрейфовый вынос неравновесных носителей заряда из области их генерации. Средняя величина напряженности электрического поля в $\text{p}^0\text{-GaAs}$ слое при отсутствии внешнего приложенного напряжения в этом случае составляет $E \approx 1.5 \cdot 10^4$ В/см, что позволяет считать дрейфовые скорости носителей близкими к насыщению.

Для исследования временных характеристик фотоприемников при изменении внешнего напряжения смещения p-i-n фотодиоды монтировались в асимметричную 50-омную полосковую линию. Импульсы фототока регистрировались с помощью стробоскопического осциллографа CI-91/3 с временным разрешением ≈ 45 пс. В качестве источника импульсов света использовался GaAs/AlGaAs ДГС РО — лазер с квантоворазмерным активным слоем, который накачивался электрическими импульсами длительностью 200 пс с частотой ≈ 10 кГц. Лазер работал в режиме генерации одиночного пика длительностью < 50 пс. Аналогичный лазер, работающий в режиме модуляции добротности, использовался в качестве источника оптических импульсов длительностью < 50 пс с частотой ~ 10 ГГц.

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов фототока, снятые при различных напряжениях смещения, приложенные к фотодиоду. Видно, что в диапазоне обратных смещений $U = -10-0$ В форма и амплитуда импульса фототока практически не изменяются. Это свидетельствует о том, что в этом диапазоне напряжений область объемного заряда занимает весь поглощающий слой и время дрейфа носителей через него меньше 70 пс. При приложении прямого смещения $U > 0.25$ В форма импульса начинает существенно меняться, т.к. ширина области объемного заряда становится меньше ширины $\text{p}^0\text{-GaAs}$ слоя, и форма заднего фронта импульса в существенной степени определяется диффузионной составляющей фототока.

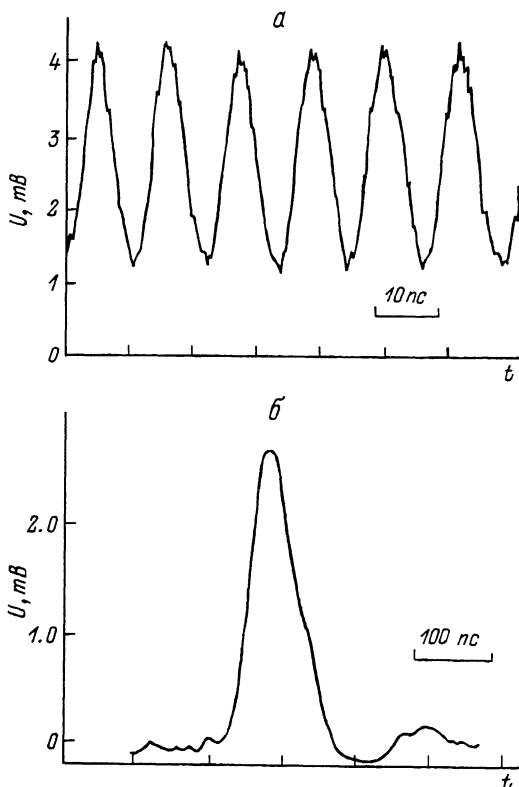


Рис. 3. Осциллограммы импульсов отклика вентильного фотоприемника при регистрации: а - излучения лазера с частотой ~ 10 ГГц, б - одиночного импульса пучка электронов длительностью ≈ 30 пс ($\tau_{\text{фронта}} = 43.5$ пс, $\tau_{\text{спада}} = 48.5$ пс).

Время пролета через поглощающий p^0 -слой толщиной $d = 0.9$ мкм с дрейфовой скоростью $v \sim 10^7$ см/с должно составлять $\tau_{\text{пр}} \approx 10$ пс. Измеренная емкость фотодиода в полосовой линии составила $C \approx 0.2$ пФ¹ при $U = -10-0$ В, контактное сопротивление $R_k \approx 6$ Ом; при работе на нагрузочное сопротивление $R_H = 50$ Ом постоянная времени RC должна быть $\tau_{RC} \approx 11$ пс. Очевидно, что измеренная длительность импульса фототока при $U = -10-0$ В определялась в основном параметрами микрополосковой линии и разрешением измерительной системы.

Для исследования быстродействия фотоприемника при работе в вентильном режиме, $p-i-n$ диод монтировался в более широкополос-

¹ Расчетная емкость исследуемого меза-фотоприемника должна составлять $C \approx 0.25$ пФ.

ную систему, изготовленную на основе СВЧ-разъема. На рис. 3, а показана осциллограмма импульса фототока приемника, смонтированного в такой системе, при освещении излучением полупроводникового лазера с насыщающимся поглотителем, работающего в режиме модуляции добротности. Видно, что быстродействие фотоприемника было не хуже 50 пс, а параметры импульсов фототока ограничены переходной характеристикой стробоскопического осциллографа С1-91/3, т.е. ≈ 45 пс. В приемнике практически отсутствовало накопление заряда за период $T = 200$ нс генерации импульсов с частотой ~ 10 ГГц. (Лазер работал в режиме генерации пакетов импульсов с периодом 100 мкс).

Измерения быстродействия фотоприемника были также проведены с помощью метода пикосекундной растровой электронной микроскопии [7], когда возбуждение носителей происходило короткими (≈ 30 пс) импульсами электронного пучка. На рис. 3, б проведена осциллограмма импульса ответа вентиляльного $p-i-n$ фотодиода, возбуждаемого таким образом. Разрешение регистрирующей системы в этом случае было ≈ 35 пс.

Оцениваемая чувствительность исследованного фотоприемника для световых импульсов составила $\approx 0.2-0.3$ А/Вт. Более тщательная заделка и проведение измерений позволяют улучшить наблюдаемые параметры импульсов. Возможно увеличение чувствительности приемника за счет некоторого увеличения толщины поглощающего слоя, стравливания p^+-GaAs слоя и нанесения просветляющего покрытия.

В заключение авторы выражают признательность В.И.Скопиной за содействие в изготовлении образцов, Н.М. Стельмаху, Л.А. Волкову, В.Е. Уманскому, О.В. Салате и П. Гавриловичу за полезные обсуждения и помощь в проведении эксперимента, Ж.И. Алферову и Е.Л. Портному за поддержку работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Bar-Chaim N., Lan K.Y., Ury I. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 3. P. 261.
- [2] Pasfaski J., Chen H.Z., Morcos H., Yariv A. // Appl. Phys. Lett., 1988. V. 52. N 17. P. 1410.
- [3] Rav-Noy Z., Harder C., Schreter U., Margalit S., Yariv A. // Electr. Lett. 1983. V. 19. N 19. P. 753.
- [4] Аверин С.В., Дмитриев М.Д., Царев А.Н., Эленкриг Б.Б. // Письма в ЖТФ, 1988. Т. 14. В. 24. С. 2215.
- [5] Андреев В.М., Егоров Б.В., Койнова А.М., Лантратов В.М., Румянцев В.Д., Сараджишвили Н.М. // ФТП, 1986. Т. 20. № 3. С. 435.

- [6] Зи С. Физика полупроводниковых приборов, т. 1. М.: Мир, 1984. 85 с.
- [7] Конников С.Г., Уманский В.Е., Лодыженский И.И. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 3. В. 19. С. 1183.

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

Поступило в Редакцию
6 марта 1989 г.