

06 2

© 1990

## ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СИГНАЛА В ПЛАНАРНЫХ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Н.М. Ушаков, А.В. Рьянов,  
А.Н. Солодкий, В.Э. Выдущ,  
А.С. Джумалиев, В.И. Петросян

Среди быстродействующих фотоприемных устройств (ФПУ) важное место занимают фотодетекторы на основе планарных многоэлементных поверхностно-барьерных структур с двойным барьером Шоттки, в частности, встречно-штыревого типа [1, 2]. До сих пор считалось, что наиболее чувствительными среди быстродействующих ФПУ являются фотодетекторы с лавинным умножением носителей [3].

Как показано в [4, 5], внутреннее фотоусиление (ВФУ) присутствует и фотоприемным устройствам с двойным барьером Шоттки (ФПУДБШ). В [4] ВФУ наблюдалось только на полуизолирующих подложках арсенида галлия в диапазоне низких частот 0–10 КГц и не наблюдалось на чистом эпитаксиальном слое. Такое поведение ВФУ связано, по мнению авторов, с захватом неравновесных носителей на глубоких ловушках подложки. С другой стороны, внутреннее усиление фотосигнала в ФПУДБШ на эпитаксиальном слое наблюдалось впервые в [5].

Поскольку в [5] исследования частотных зависимостей фотоотклика инжекционных фотоприемных устройств с двойным барьером Шоттки (ИФПУДБШ) проводилось только на низких частотах модуляции, то целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование фотоотклика ИФПУДБШ на арсениде галлия при модуляции сигнала в ВЧ и СВЧ диапазонах длин радиоволн.

Экспериментальные образцы ФПУДБШ представляли собой эпитаксиальные структуры  $n - GaAs / s.i / Nd = 8 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_{300K} = 8.5 \cdot 10^3 \text{ см}^2 (\text{Вс})^{-1}$ , выращенные методом хлоридной газовой эпитаксии на полуизолирующих подложках  $GaAs \langle C \rangle$ . Толщина эпитаксиального слоя составляла 3–5 мкм. Формирование контактов из алюминия с встречно-штыревой топологией производилось аналогично описанному в работе [5]. Апертура исследуемых ИФПУДБШ составляла 40 и 100 мкм. Межэлектродное расстояние во встречно-штыревой структуре 1–2.5 мкм.

Измерительная установка для исследования частотных свойств ФПУДБШ состояла из лазера ЛГ-126, оптической системы формирования световых пучков, держателя ФПУ с блоком разделения постоянной и переменной составляющих сигнала, спектроанализатора СЧ-27, измерителей Х1-42 и Е7-12, блоков питания ТЕС-14, Б5-47.

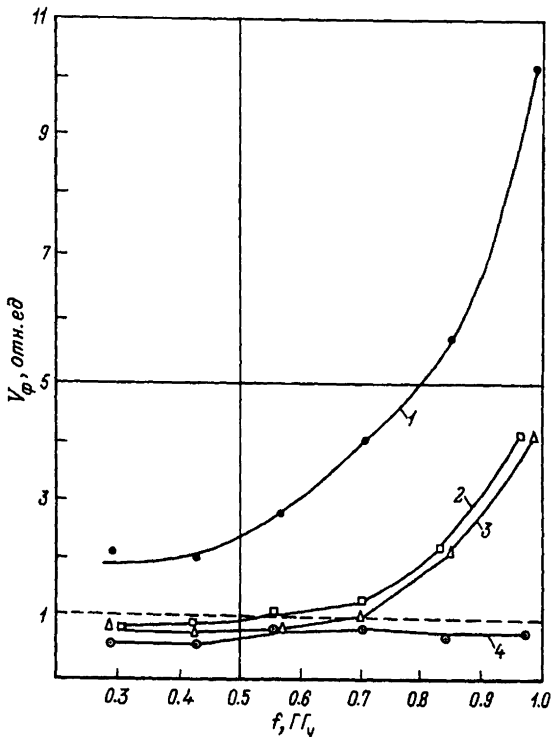


Рис. 1. Зависимости АЧХ ИФПУ ДБШ с различной высотой барьера: 1 -  $\Phi_{\text{ВП}}=0.62 \pm 0.02$  эВ; 2 -  $\Phi_{\text{ВП}}=0.66$  эВ, 3 -  $\Phi_{\text{ВП}}=0.58$  эВ. Зависимости АЧХ ЛФД (пунктирная прямая) и  $p-i-n$  диода (кривая 4).

Измерения емкости ИФПУДБШ проводились в темновом режиме с помощью измерителя Е7-12.

Значения КСВН для ИФПУДБШ определялись с помощью измерителя Х1-42 в диапазонах 0-1.2 ГГц как в темновом режиме, так и при подсветке лазерным излучением (632.8 нм) интенсивностью 0.25 мВт/мм<sup>2</sup>. В темновом режиме значение КСВН=5 мало менялось с частотой. При подсветке КСВН начинал снижаться с ростом частоты и становился меньше двух при 800 МГц.

Частотный отклик ИФПУДБШ измерялся в видимом оптическом диапазоне (632.8 нм) в режиме гомодинного детектирования сигнала на частотах, кратных частоте продольной моды открытого резонатора лазера 140 МГц. Ширина линии излучения лазера ЛГ-126 обеспечивала шесть точек измерения в пределах 140-980 МГц. Указанная полоса частот является рабочей для широко применяемого

ФПУ типа ЛФД-2А. Поэтому для сравнения измеряемая АЧХ ИФПУ ДБШ приводилась к АЧХ ЛФД-2А.

На рис. 1 изображены в относительных единицах зависимости АЧХ ИФПУДБШ с различной высотой барьера. Значение сигнала для ЛФД-2А в указанном частотном интервале принято за единицу (пунктирная линия). Значение фотосигнала ЛФД-2А на частотах, меньших 400 МГц, составляло 12 мВ при интенсивности входного оптического сигнала 0.25 мВт/мм<sup>2</sup>. Все приведенные зависимости измерены при разных постоянных смещениях, соответствующих максимуму чувствительности. Для сравнения чувствительности разных ФПУ на том же графике изображена АЧХ р-і-n-фотодектора с чувствительностью 0.4 А/Вт на частотах, меньших 400 МГц. Режим ВФУ имел место для структур с высотой барьера в пределах 0.6-0.64 эВ (кривая 1). В то же время при значениях высоты барьера больших 0.64 эВ ( $\Phi_{\text{вп}} \approx 0.66$  эВ, кривая 2) внутреннее усиление на этих частотах не наблюдалось. Из приведенных на рис. 1 зависимостей следует, что максимальной чувствительностью на частотах до 1 ГГц обладают ИФПУ ДБШ с высотой барьера, равной 0.6-0.64 эВ. Такое поведение фоточувствительности в зависимости от высоты барьера можно объяснить, рассмотрев три случая: 1) высота барьера  $\Phi_{\text{вп}} < 0.6$  эВ, 2)  $\Phi_{\text{вп}} \approx 0.6-0.64$  эВ, 3)  $\Phi_{\text{вп}} > 0.64$  эВ. При этом следует считать оптимальным случаем, когда глубина ОПЗ- $W_0$  и глубина оптического поглощения в полупроводнике  $\propto^{-1}$  равны, где  $\alpha$  - коэффициент оптического поглощения в арсениде галлия. Поэтому для  $\Phi_{\text{вп}} < 0.6$  эВ концентрация носителей в полупроводнике  $n > n_0$ , где  $n_0$  - концентрация, при которой чувствительность ИФПУДБШ максимальна. Следовательно, глубина ОПЗ  $W \ll \alpha^{-1} = W_0$ . Как следствие, квантовая эффективность  $\eta < \eta_0$ , где  $\eta_0$  - оптимальная величина квантовой эффективности. И хотя коэффициент внутреннего усиления в этом случае  $G > 1$ , ампер-ваттная чувствительность меньше оптимальной.

Для  $\Phi_{\text{вп}} > 0.64$  эВ имеем  $W > \alpha^{-1}$ ,  $G \approx 1$  и квантовая эффективность  $\eta < \eta_0$ . Поэтому оптимальным является случай, когда  $\Phi_{\text{вп}} = 0.6-0.64$  эВ.

На рис. 2 представлены зависимости величины фотосигнала от постоянного смещения, измеренные на разных частотах модуляции: 10 Гц (кривая 1), 280 МГц (кривая 2) и 700 МГц (кривая 3).

Измерения с низкочастотной модуляцией проводились при нагрузочном сопротивлении 1 КОм, падающем световом потоке 1 мкВт. При этом амперваттная чувствительность ИФПУДБШ составляла 5-6 А/Вт. Фотоотклик при модулирующих частотах в СВЧ диапазоне измерялся при  $R_H = 50$  Ом, падающем оптическом излучении 0.25 мВт. Амперваттная чувствительность имела величину 1.6-2 А/Вт, что соответствовало коэффициенту усиления  $G \approx 2.2$ . Такое различие в фоточувствительности свидетельствует о включении на низких частотах модуляции дополнительного механизма внутреннего усиления, связанного с полевой эмиссией электронов из обратносмещенного контакта при захвате фотогенерированных носителей

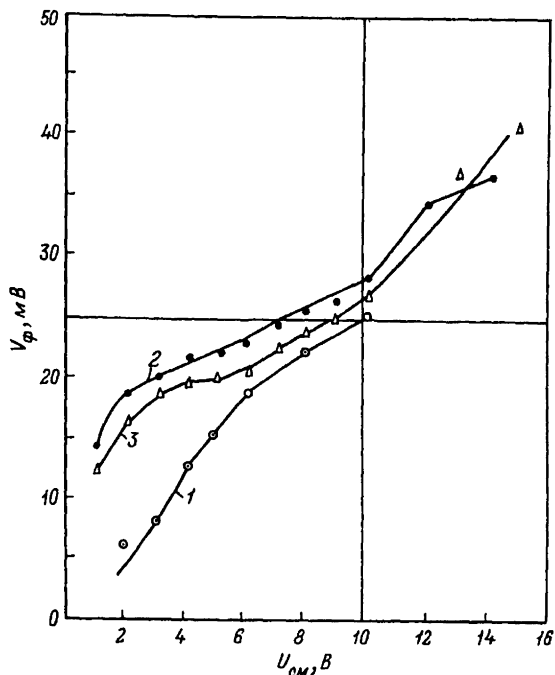


Рис. 2. Зависимости фотосигнала ИФПУДБШ от постоянного смещения на разных частотах модуляции: 1 -  $f = 10$  Гц, 2 -  $f = 280$  МГц, 3 -  $f = 700$  МГц.

на глубоких ловушках арсенида галлия. Полученные результаты согласуются с результатами [4].

Граничные частоты ИФПУДБШ по оценке их постоянной времени лежат в пределах октавы 15–30 ГГц. Измерение быстродействия таких структур было проведено импульсным методом. Сам метод и установка, на которой проведено измерение, описаны в [7]. Измеренная постоянная времени ИФПУДБШ с внутренним усилением составила 60–70 пс.

Таким образом, планарные инжекционные фотоприемные устройства с двойным барьером Шоттки-Бардина обеспечивают высокие чувствительность и быстродействие в режиме внутреннего усиления, которые превышают аналогичные параметры лавинных фотодетекторов типа ЛФД-2.

В заключение авторы благодарят С.В. Аверина за проведенные измерения быстродействия импульсным методом.

- [1] O s a m u W a d a // Optical and Quantum Electronics. 1988. V. 20. P. 441-474.
- [2] R o t h W., S c h u m a c h e r H., K l u - g e l., G l u n H., B e n e k i n g H. // IEEE Trans. on ED. 1985. V. 32. N 6. P. 1034-1036.
- [3] F o r r e s t S. // IEEE Spectrum. 1986. V. 28. N 5. P. 76-84.
- [4] А ф а н а с ь е в В.Б., М а р а х о н о в В.Н., С и - л и н Г.С., Т а в а е т ш е р н а О.Г., Х р у с т а л е - в а В.В. // Матер. 1 Всес. конф. „Физические основы твердотельной электроники“. Ч. А. Л., 1989. С. 8-9.
- [5] У ш а к о в Н.М., С о л о д к и й А.Н., В ы д у ц В.Э., П е т р о с я н В.И. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 1. С. 17-21.
- [6] В о л к о в Л.А., Г о р е л ь н о к А.Т., Л у к ь я - н о в В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 17. С. 1059-1062.
- [7] А в е р и н С.В., Д м и т р и е в М.Д., Ц а р е в А.Н., Э л е н к р и г Б.Б. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 24. С. 2215-2218.

Поступило в Редакцию  
16 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 20

26 октября 1990 г.

01

© 1990

ВЫНУЖДЕННОЕ САМОИЗЛУЧЕНИЕ  
НЕЛИНЕЙНЫХ „РЕЗОНАТОРОВ“

А.В. Д а в ы д о в, Г.И. Д о л г и х

В последнее время проводятся экспериментальные исследования по нелинейной сейсмоакустике в естественных условиях [1, 2]. Все теоретическое обоснование экспериментальных результатов строится на волновой точке зрения. При теоретическом объяснении полученных результатов возникает много неясных вопросов, решение которых требует проведения более тщательных модельных экспериментов, приближенных к натуральным. Первые модельные эксперименты на региональной системе нелинейных „резонаторов-ревербераторов“, состоящей, в основном, из подземных искусственных сооружений, дали положительные результаты [3]. Представление