

06;09;12

## **Экспериментальное исследование параметрического взаимодействия волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах на основе арсенида галлия**

© А.И. Михайлов

Саратовский государственный университет им Н.Г. Чернышевского

Поступило в Редакцию 6 июля 1999 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния низкочастотной накачки на выходной спектр тонкопленочной полупроводниковой структуры (ТПС) с дрейфом электронов на основе  $n$ -GaAs в 3-см и 8-мм диапазонах. При подаче на входной элемент связи ТПС кроме слабого сигнала с частотой  $f_s$  еще и мощной низкочастотной накачки с частотой  $f_p$  ( $f_p < f_s$ ) в выходном спектре ТПС появляются полосы частот, отстоящие друг от друга на частотный интервал  $\Delta f = f_s - f_p$ , в которых прохождение СВЧ сигналов значительно улучшается. Последнее является свидетельством существования эффективной параметрической связи волн пространственного заряда, распространяющихся в дрейфовом потоке электронов, и подтверждает выводы теории.

В работах [1–3] теоретически изучались различные вопросы, относящиеся к параметрическому взаимодействию волн пространственного заряда (ВПЗ) в тонкопленочных полупроводниковых структурах (ТПС) с отрицательной дифференцированной проводимостью (ОДП) на основе таких полупроводников, как  $n$ -GaAs и  $n$ -InP. Было показано, что подача низкочастотной накачки приводит к тому, что затухающие в обычных условиях (без накачки) ВПЗ могут при определенных условиях стать нарастающими. Кроме того, эффект параметрического взаимодействия ВПЗ в ТПС с ОДП может использоваться для получения эффективного преобразования частоты и управляемой фильтрации сигналов в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Экспериментальные данные по этим вопросам в литературе практически

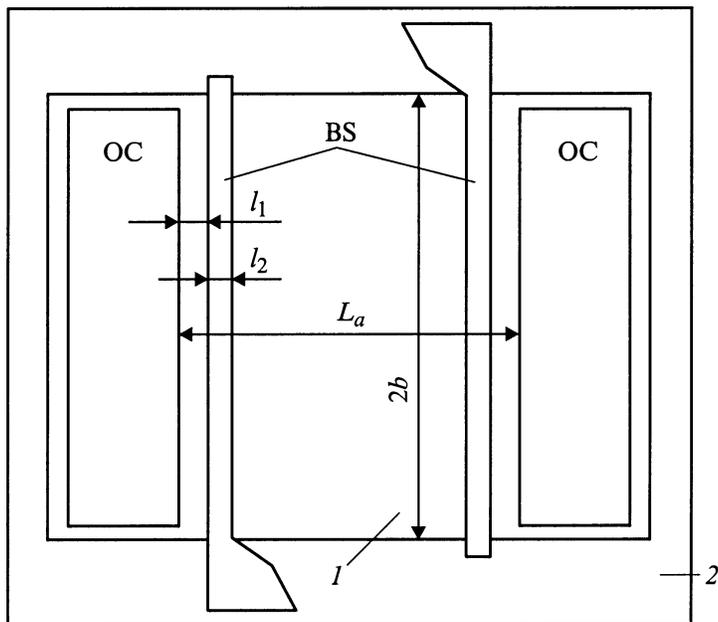


Рис. 1. Топология тонкопленочной полупроводниковой структуры.

отсутствуют. Исключение составляют работы [4,5], в которых сообщались предварительные экспериментальные результаты.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния низкочастотной накачки на выходной спектр ТПС на основе  $n$ -GaAs в 3-см и 8-мм диапазонах.

ТПС имеет вид планарной конструкции (вид сверху топологии изображен на рис. 1) и представляет собой эпитаксиальную пленку  $n$ -GaAs 1 толщиной  $1 \div 5 \mu\text{m}$ , выращенную на полуизолирующей подложке 2 ( $i$ -GaAs). Концентрация электронов в пленке  $n_0$  выбирается исходя из необходимости обеспечения стационарного распределения поля и концентрации электронов (т.е. для предотвращения образования ганновских доменов) и равна  $n_0 = (2 \div 6) \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$ . На поверхности пленки созданы катодный и анодный омические контакты (на рис. 1

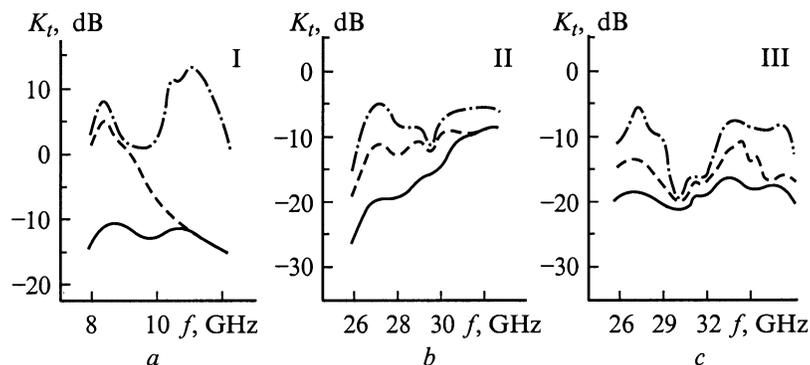
Партия	I	II	III
$2a, \mu\text{m}$	4	2.2	1.4
$n_0, 10^{14} \text{cm}^{-3}$	3	3.5	6
$2b, \mu\text{m}$	300	320	290
$L_a, \mu\text{m}$	60	100	60
$l_1, \mu\text{m}$	8	5	2.5
$l_2, \mu\text{m}$	8	5	1.5

*OC*) и расположенные между ними входной и выходной элементы связи ТПС с электродинамической системой, выполненные в виде одинаковых одиночных полосковых контактов с барьером Шоттки (на рис. 1 *BS*). Между катодным и анодным *OC* в рабочем режиме прикладывается большое статическое напряжение смещения  $U_A$  выше порогового, которое вызывает дрейф электронов в пленке. Входной и выходной полосковые *BS* служат для преобразования входных электромагнитных сигналов в ВПЗ и для обратного преобразования ВПЗ в выходные электромагнитные сигналы. Расстояние между катодом и анодом (длина активной области)  $L_a$  должно быть не менее нескольких длин ВПЗ и, исходя из этого, выбиралось равным в разных вариантах ТПС от 60 до 120  $\mu\text{m}$ . Апертура ( $2b$ ) исследуемых структур была равна 290 ÷ 500  $\mu\text{m}$ , что с большим запасом обеспечивает работу в области Френеля [6], поскольку при этом  $L_a\lambda/b^2 < 1$ . Зазоры  $l_1$  между омическими контактами катода и анода и расположенными рядом с ними *BS*, а также ширина самих *BS*  $l_2$  была от 1.5 до 8  $\mu\text{m}$  в разных исследованных конструкциях ТПС.

Поверхность всей структуры (за исключением контактных площадок) покрывалась тонкой ( $\sim 0.3 \mu\text{m}$ ) пленкой двуокиси кремния. Толщина металлических пленок полосковых *BS* равна 0.3 ÷ 0.5  $\mu\text{m}$ , а на контактных площадках *BS* и *OC* она увеличена до 1 ÷ 1.5  $\mu\text{m}$ .

В экспериментальных исследованиях использовались семь партий ТПС. Электрофизические параметры трех партий, на которых были получены лучшие результаты, приведены в таблице.

Экспериментальные исследования параметрического взаимодействия ВПЗ в ТПС на *n*-GaAs проводились в 3-см, 2-см и 8-мм диапазонах длин волн с использованием панорамных измерителей КСВН



**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости  $K_t$  от  $f$ :  $a$  —  $P_p = 10.8$  мВт,  $f_p = 2.3$  ГГц,  $U_A = 34$  В;  $b$  —  $P_p = 18$  мВт,  $f_p = 4$  ГГц,  $U_A = 16.5$  В;  $c$  —  $P_p = 6$  мВт,  $f_p = 8$  ГГц,  $U_A = 11$  В.

и ослабления и, в частности, P2-61 и P2-65. В данной работе приводятся наиболее характерные результаты, полученные при исследованиях в 3-см и 8-мм диапазонах. В качестве генераторов накачки использовались генераторы Г4-79 (1.77–2.58 ГГц), Г4-80 (2.56–4 ГГц) и генератор качающейся частоты (ГКЧ) из состава панорамного измерителя P2-61 (8–12 ГГц). СВЧ сигналы подводились и отводились от ТПС с помощью отрезков копланарных волноводов.

Методика экспериментальных исследований ТПС состояла в следующем. 1. На исследуемую ТПС в холодном режиме (при отключенных постоянных напряжениях и накачке) подавался СВЧ сигнал с частотой  $f$  в диапазоне свипирования ГКЧ панорамных измерителей P2-61 и P2-65 и на индикаторе фиксировалась картина прошедшего сигнала в исследуемом частотном диапазоне, т. е. измерялся коэффициент передачи  $K_t$  в диапазоне частот  $f$  (1-е измерение). 2. На исследуемую ТПС подавались напряжения, питающие входной и выходной барьеры Шоттки и напряжение между катодом и анодом  $U_A$ , соответствующее падающему участку на вольт-амперной характеристике. На индикаторе вновь фиксировалась картина прошедшего сигнала (2-е измерение). 3. Дополнительно к постоянным питающим напряжениям на исследуемую ТПС подавалась мощность накачки  $P_p$  и вновь на индикаторе

фиксирувалась картина прошедшего сигнала в диапазоне исследования (3-е измерение).

Результаты измерений  $K_t$  в зависимости от частоты  $f$  приведены на рис. 2, где сплошные линии — 1-е измерение, пунктирные линии — 2-е измерение, линии точка-пунктир — 3-е измерение. Номер партии ТПС указан римской цифрой в правом верхнем углу соответствующего рисунка. Мощность входного сигнала во всех экспериментах была в пределах от 0.1 до  $1 \mu\text{W}$ , а постоянные напряжения на входном и выходном барьерах Шоттки были равны  $-2$  и  $-0.5 \text{ V}$  соответственно. Мощность и частота накачки ( $P_p$  и  $f_p$ ), а также значения  $U_A$  указаны в подписи к рис. 2.

Как видно из всех приведенных экспериментальных результатов, под воздействием накачки в спектре прошедших сигналов появляются два диапазона (верхний и нижний), частоты которых (обозначим их  $f_s$  и  $f_i$  соответственно) связаны между собой и частотой накачки  $f_p$  соотношением  $f_s - f_i = f_p$ . Нужно сказать, что такое соотношение между частотами наблюдалось во всех экспериментах независимо от конкретных значений частоты накачки и ее мощности. В 3-см диапазоне, как видно, действие накачки является более сильным: за счет подачи накачки удается получить абсолютное усиление сигналов в частотных полосах  $f_s$  и  $f_i$ . Следует сказать, что частоты  $f_s$  и  $f_i$  для исследованных ТПС были такими, что на них обоеих одновременно в обычном монохроматическом режиме (без накачки) абсолютного усиления не наблюдалось ни при каких режимах питания по постоянному току. В 8-мм диапазоне абсолютного усиления получить не удалось. Последнее, очевидно, связано с тем, что именно в этом диапазоне находится граничная частота усиливаемых ВПЗ для  $n\text{-GaAs}$  [7,8].

Таким образом, приведенные экспериментальные результаты показывают, что подача низкочастотной накачки ( $f_p < f_s$ ) обеспечивает эффективную параметрическую связь ВПЗ с частотами  $f_s$  и  $f_i$ , что подтверждает данные теоретических работ [1–3].

Автор выражает искреннюю благодарность профессору А.А. Барыбину и его сотрудникам А.А. Левицкому и М.С. Кравцову за предоставленные образцы ТПС (I и II партии) и помощь в проведении экспериментов, а также С.А. Сергееву за помощь в проведении части экспериментов.

## Список литературы

- [1] *Игнатъев Ю.М., Михайлов А.И.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33. № 10. С. 76–78.
- [2] *Михайлов А.И., Сергеев С.А.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1995. Т. 38. № 10. С. 43–51.
- [3] *Михайлов А.И., Сергеев С.А.* // Письма в ЖТФ 1996. Т. 22. В. 24. С. 75–78.
- [4] *Иванченко В.А., Игнатъев Ю.М., Михайлов А.И.* // Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1988. Ч. 2. С. 117–118.
- [5] *Иванченко В.А., Михайлов А.И.* // Сб. тез. докл. Всесоюз. совещ. "Электроника: преобразователи информации". Москва–Нижний Новгород, 1991. С. 12–14.
- [6] *Балодис Ю.Н., Лутовинов С.И.* Устройства функциональной электроники. Ч. 1. Акустоэлектронные устройства. Л.: ЛИЭС, 1988. 63 с.
- [7] *Михайлов А.И.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 21. С. 89-95.
- [8] *Михайлов А.И., Сергеев С.А.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 4. С. 85-90.