

06.2;09

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОЛН ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

© А.И.Мизайлов, С.А.Сергеев

Перспективным классом функциональных микроэлектронных устройств СВЧ диапазона являются устройства на волнах пространственного заряда (ВПЗ) в полупроводниках с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), обусловленной междолинными электронными переходами в сильных электрических полях. В [1] указывается, что эти устройства, типичным представителем которых является тонкопленочный усилитель бегущей волны, могут использоваться как усилители, гетеродины (при введении обратной связи), линии задержки, коммутаторы. В работах [2-4] теоретически и экспериментально показано, что параметрический режим работы такого усилителя с низкочастотной накачкой не только повышает граничную частоту усиления ВПЗ, но и позволяет дополнить перечень его возможных функций по крайней мере двумя: смешение со сдвигом частоты и управляемая фильтрация с прерстройкой путем изменения частоты накачки. Теоретические работы, посвященные исследованию взаимодействия (параметрического усиления, преобразования) волн пространственного заряда в полупроводниках с ОДП, в большинстве случаев используют одномерные пространственные модели, что ограничивает их справедливость, поскольку в реальных усилителях для предотвращения ганновских осцилляций применяются тонкопленочные полупроводниковые структуры с толщиной рабочего слоя, сравнимой с длиной волны пространственного заряда.

В данной работе приводятся результаты теоретического исследования параметрического преобразования частоты в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью, изучается влияние параметров накачки и толщины пленки на коэффициент преобразования.

Для проведения теоретического исследования преобразования частоты в данной работе используется подход, по-

дробно описанный в [5], где была сформулирована математическая модель для анализа исследуемого параметрического взаимодействия. Система координат выбирается таким образом, что ось  $y$  перпендикулярна, а ось  $z$  параллельна плоскости пленки и делит ее по толщине пополам. В пленке  $n$ -GaAs создано сливное постоянное электрическое поле, параллельное плоскости пленки и оси  $z$ , напряженность которого  $E_0$  соответствует участку ОДП на зависимости дрейфовой скорости электронов от  $E_0$ . Предположим, что в пленке  $n$ -GaAs, кроме слабой ВПЗ с частотой  $f_s$  (сигнал) возбуждена и более интенсивная волна накачки с частотой  $f_p < f_s$  (низкочастотная накачка) и амплитудой  $E_{p0}$ . Вследствие нелинейности полупроводника в потоке электронов возникает волна холостой частоты  $f_i = f_s - f_p$ . В результате анализа в [5] была получена система уравнений для амплитуд связанных сигнальной и холостой частот, которая представляет собой систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. В результате численного решения этой системы в [5] рассчитывались амплитуды  $E_s$  и  $E_i$  связанных сигнальной  $f_s$  и холостой  $f_i$  частот на конце участка взаимодействия длиной  $l$  и определялся коэффициент передачи на частоте  $f_s$  по формуле

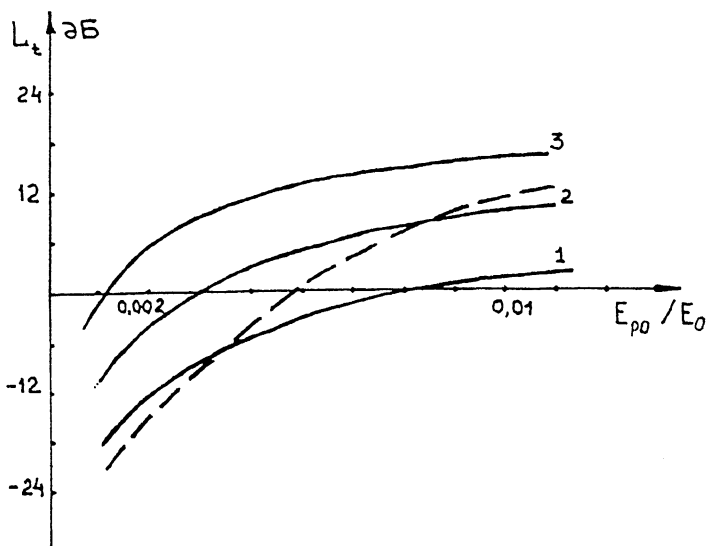
$$L = 20 \cdot \lg(E_s/E_{s0}), \quad (1)$$

где  $E_{s0}$  — амплитуда волны пространственного заряда сигнала в начале участка взаимодействия.

При анализе результатов [5] указывалось на возможность получения эффективного преобразования частот при исследуемом параметрическом взаимодействии. В данной работе приводятся результаты расчета коэффициента преобразования:

$$L_t = 20 \cdot \lg(E_i/E_{s0}). \quad (2)$$

Для проведения численных расчетов были использованы значения параметров и физических величин, характерные для  $n$ -GaAs: относительная диэлектрическая проницаемость 12.5; для  $E_0 = 5.5$  кВ/см дрейфовая скорость  $1.7 \cdot 10^7$  см/с, коэффициент диффузии  $160$  см<sup>2</sup>/с. Этому же  $E_0$  соответствуют зависимости дифференциальной подвижности электронов от частоты, рассчитанные методом Монте-Карло в работе [6]. Варьируемыми параметрами в расчетах были  $f_s$ ,  $f_p$ ,  $f_i$ ,  $E_{p0}/E_0$ ,  $l$  и толщина пленки  $T$ . Результаты расчетов приведены на рисунке, где изображены зависимости  $L_t$  от  $E_{p0}/E_0$  при  $f_s = 35$  ГГц,  $f_p = 20$  ГГц,  $f_i = 15$  ГГц при толщине пленки  $T = 10$  мкм и длине взаимодействия  $l = 40$  мкм (кривая 1), 50 мкм (2) и 60 мкм (3). На



Зависимость коэффициента преобразования  $L_t$  от  $E_{p0}/E_0$ ;  $f_s = 35$  ГГц,  $f_p = 20$  ГГц,  $f_i = 15$  ГГц,  $T = 10$  мкм;  $l = 40$  мкм (кривая 1),  $50$  мкм (2) и  $60$  мкм (3).

Пунктирная кривая — зависимость  $l$  от  $E_{p0}/E_0$  для  $l = 60$  мкм.

рисунку для сравнения приведена зависимость  $L$  от  $E_{p0}/E_0$ , рассчитанная по формуле (1), для тех же частот  $f_s$ ,  $f_p$  и  $f_i$  при толщине пленки  $T = 10$  мкм и  $l = 60$  мкм (пунктирная кривая).

Как видно из рисунка, с увеличением амплитуды накачки  $L_t$  возрастает и при определенных значениях  $E_{p0}/E_0$  становится положительной величиной ( $L_t > 0$  — автодинное преобразование). Результаты расчетов показывают также, что увеличение  $l$  приводит к росту  $L_t$ , поскольку  $f_i$  в выбранном для расчетов случае ниже граничной частоты усиливаемых ВПЗ, вследствие чего холостая ВПЗ является нарастающей даже при отсутствии параметрического взаимодействия. Вследствие ослабления пространственного заряда и выхода части силовых линий за пределы пленки, уменьшение ее толщины  $T$  приводит к уменьшению как  $L$ , так и  $L_t$ .

Таким образом, результаты данной работы показывают, что параметрическое взаимодействие волн поверхностного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью на  $n$ -GaAs при низкочастотной накачке может использоваться для эффективного преобразования частоты в 8-мм диапазоне, что согласуется с экспериментальными результатами работы [4].

## Список литературы

- [1] Барыбин А.А. и др. // Микроэлектроника. 1979. Т. 8. В. 1. С. 3-19.
- [2] Иванченко В.А., Климов Б.Н., Михайлов А.И. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 6. С. 1172-1174.
- [3] Иванченко В.А., Игнатьев Ю.М., Михайлов А.И. // Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1988. Ч. 2. С. 117-118.
- [4] Иванченко В.А., Михайлов А.И. // Сб. тез. докл. Всесоюзн. совещ. "Электроника: преобразователя информации". М., Нижний Новгород, 1991. С. 12-14.
- [5] Михайлов А.И., Сергеев С.А. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1995. Т. 38. № 9-10. С. 43-51.
- [6] Rees H.D. // Solid State Com: 1969. V. 7. N 2. P. 267-269.

Поступило в Редакцию  
15 июля 1996 г.