

## СВЧ ШУМ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ В GaAs ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ КРИСТАЛЛА 10—100 К

Аитов Р. Д., Маслов А. И., Ржевкин К. С.

На частотах 2—4 ГГц измерена продольная шумовая температура  $T_m$  горячих электронов в образцах  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $10^{15}$  см $^{-3}$  в диапазоне температур кристалла  $T_0=10$ —100 К. На зависимостях  $T_m(T_0)$  при охлаждении кристалла и фиксированных напряжениях греющего смещения  $U$  наблюдались три участка: возрастание  $T_m$  после минимума вблизи  $T_0=100$  К, замедление роста  $T_m$  вблизи  $T_0=60$  К и различие в ходе кривых для частот 2 и 4 ГГц при температурах ниже 20 К. Прослеживалась корреляция между ходом зависимости  $T_m(U)$  и коэффициентом нелинейности ВАХ во всем диапазоне температур кристалла. На начальном участке ВАХ при  $T_0=77$  К и ниже наблюдалось резкое увеличение ее нелинейности, связанное с суперлинейным ростом тока.

Исследование электрических флуктуаций в GaAs в условиях разогрева электронов в широком диапазоне температур кристалла является весьма важной задачей с практической точки зрения, особенно в СВЧ диапазоне, где шум горячих электронов является преобладающим. При охлаждении кристалла GaAs до температуры жидкого азота удалось получить рекордное для полупроводниковых приборов быстродействие, приближающееся к быстродействию приборов на джозефсоновских переходах.

Эти исследования представляют интерес и с принципиальной точки зрения, поскольку изучаются флуктуации в существенно неравновесной системе, какой является электронный газ полупроводника в сильном электрическом поле.

Измерение шумовой температуры  $T_m$  горячих электронов в GaAs проводилось в СВЧ диапазоне в [1—4] при комнатной температуре, а в [5, 6] и при температуре жидкого азота. В [7] проводились исследования шумовых характеристик полевых транзисторов (ПТ) на GaAs с уровнем легирования в канале  $3 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$  в диапазоне температур 20—300 К. Было высказано предположение, что при охлаждении ПТ шумовая мощность горячих электронов может оставаться постоянной или даже увеличиваться. В [8] измерялась  $T_m$  образцов GaAs с уровнем легирования  $10^{15}$  см $^{-3}$  в диапазоне 77—300 К на частоте 3 ГГц. Было обнаружено, что при фиксированном напряжении смещения происходит возрастание  $T_m$  при охлаждении кристалла ниже 100 К. Это явление объяснялось резким возрастанием разогревной нелинейности ВАХ, возникающим при охлаждении кристалла GaAs с малым уровнем легирования.

В настоящей работе ставилась задача проследить за изменением  $T_m$  горячих электронов при более глубоком охлаждении кристалла GaAs. В качестве образцов для исследования СВЧ шумов были выбраны диоды Ганна АА703, которые представляют собой  $n^+ - n - n^+$ -структуру с длиной  $n$ -области 10 мкм и уровнем легирования в ней  $(1 \div 3) \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ . Разогрев электронов осуществлялся в допороговом режиме при подаче постоянного напряжения смещения. Шумовая температура диода измерялась модуляционным радиометром П5-16 в диапазоне частот 2—4 ГГц. Калибровка СВЧ тракта проводилась с помощью генератора шума и по измерению  $T_m$  диода в отсутствие напряжения смещения. Согласование импеданса диода, изменяющегося при охлаждении кристалла и нагреве электронов, с 50-омным СВЧ трактом обеспечивалось с помощью дистанционно управляемого диэлектрического трансформатора сопротивлений, размещенного в кристате непосредственно вблизи диода с целью уменьшения потерь. Экспе-

риментальная установка позволила достичь охлаждения исследуемых образцов до 10 К при их тепловыделении до 100 мВт и более. Расход жидкого гелия при этом составлял 0.2 л/ч. Перегрев кристалла относительно теплоотвода не превышал 10 К при напряжениях смещения до 1.5 В. Следящая электронная система обеспечивала постоянство температуры кристалла с точностью 0.1 К.

Одновременно с измерением  $T_m$  измерялся коэффициент нелинейности ВАХ, за который была принята величина  $\beta = \frac{d^2U}{dJ^2} \bigg/ \frac{dU}{dJ}$ , где  $U = U(J)$  — ВАХ диода. Этот коэффициент с точностью до постоянного множителя совпадает с вольтватт-

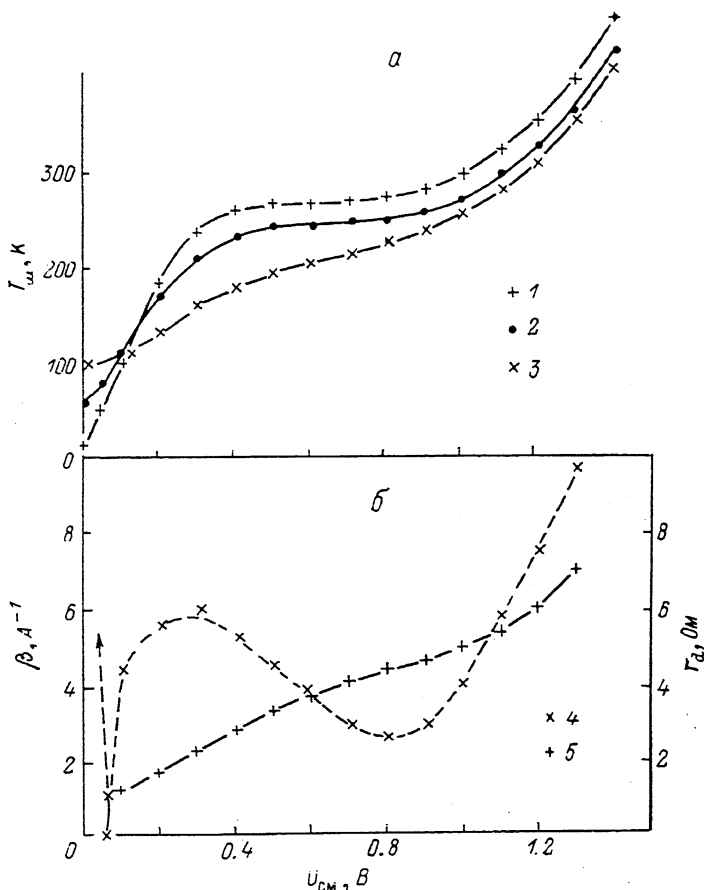


Рис. 1. Зависимости шумовой температуры  $T_m$  (а), коэффициента нелинейности ВАХ  $\beta$  (б) и дифференциального сопротивления образца  $r_d$  (б) от напряжения смещения на образце  $U_{см}$ .  $T_0$ , К: 1, 4, 5 — 10, 2 — 60, 3 — 100.

ной характеристикой детекторов. Измерения  $\beta$  проводились следующим образом. Через диод задавался слабый переменный ток (величиной около 1 мА) с частотой 1 кГц и измерялись амплитуды первой и второй гармоник переменного напряжения на диоде. Величина  $\beta$  равна отношению амплитуд первой и второй гармоник.

На рис. 1 изображены экспериментально полученные зависимости  $T_m$ ,  $\beta$  и дифференциального сопротивления  $r_d$  от напряжения смещения  $U$  для диапазона температур 10—100 К.

Зависимости  $T_m(U)$ ,  $\beta(U)$  и  $r_d(U)$  весьма слабо изменяются при понижении температуры кристалла ниже 60 К, поэтому на рисунке представлены лишь три кривые  $T_m(U)$  из всего семейства и по одной кривой для  $\beta(U)$  и  $r_d(U)$  при  $T_0 = 10$  К.

Ранее наблюдаемый участок замедленного роста на кривой  $T_m(U)$  для  $T_0 = 77$  К [5] обнаруживается и при понижении  $T_0$  ниже 77 К, что также соответствует падающему участку на зависимости  $\beta(U)$  и замедленному росту кривой  $r_d(U)$ .

Следует отметить одну особенность ВАХ диода Ганна, обнаруженную при температурах кристалла ниже 77 К и проявляющуюся при напряжениях смещения до нескольких мВ. На ВАХ диода появляется участок суперлинейного роста тока, сопровождающийся резким возрастанием коэффициента нелинейности  $\beta$  до значений, характерных для детектирующих устройств. ВАХ диода при этом по-прежнему симметрична началу координат. Отсутствие разогрева электронов при таких малых напряжениях смещения позволяет предположить барьерный механизм возникающей нелинейности  $\beta$ .

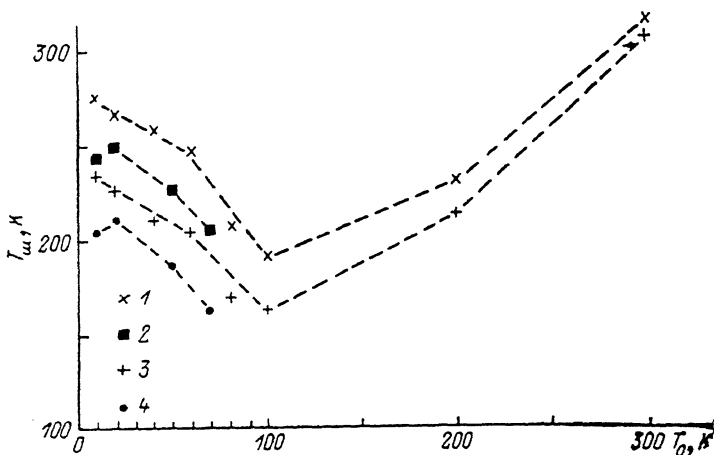


Рис. 2. Зависимости шумовой температуры  $T_{ш}$  от температуры кристалла  $T_0$ .

$U_{ок}$ , В: 1, 2 — 0.6, 3, 4 — 0.4,  $f$ , ГГц: 1, 3 — 2, 2, 4 — 4.

На рис. 2 изображены зависимости  $T_{ш}$  от  $T_0$  при фиксированных напряжениях смещения. Измерения  $T_{ш}$  проводились на частотах 2 и 4 ГГц. На приведенных кривых можно выделить три участка: возрастание  $T_{ш}$  после минимума вблизи  $T_0=100$  К, замедление роста  $T_{ш}$  вблизи  $T_0=60$  К, различие в ходе кривых  $T_{ш}(T_0)$  для частот 2 и 4 ГГц при температурах ниже 20 К. Возрастание  $T_{ш}$  при охлаждении кристалла ниже 100 К и замедление роста  $T_{ш}$  при температурах ниже 60 К совпадают с аналогичным поведением коэффициента нелинейности ВАХ.

Частотные различия в ходе кривых  $T_{ш}(T_0)$  ниже  $T_0=20$  К свидетельствуют о начале проявления инерционных свойств разогретого электронного газа. В GaAs время релаксации электронов по энергии  $\tau_e$  увеличивается с понижением температуры кристалла, и при используемых для измерения  $T_{ш}$  частотах  $\omega$  начинает выполняться соотношение  $\omega\tau_e=1$ . Взаимное смещение зависимостей  $T_{ш}(T_0)$  для частот 2 и 4 ГГц, наблюдаемое на рис. 2 при  $T_0$  выше 20 К, связано с тем, что измерения на этих частотах проводились на различных диодах. Кроме того, на частоте 2 ГГц возможен дополнительный вклад в  $T_{ш}$  за счет генерационно-рекомбинационного шума.

#### Список литературы

- [1] Baechtold W. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1972. V. ED-19. N 5. P. 674—680.
- [2] Атанасов Р., Ржевкин К. С. // ФТП. 1974. Т. 7. В. 5. С. 867—870.
- [3] Graffeuil J., Sautereau J. F., Martin J. C. // Noise in Phys. Syst. Berlin—Geidelberg—N. Y., 1978. P. 106—109.
- [4] Барейкис В., Викторавичус В., Гальдикас А., Милюшите Р. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 7. С. 1427—1429.
- [5] Маслов А. И., Ржевкин К. С. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 167—169.
- [6] Барейкис В., Билькис Ж., Либерис Ю., Матуленис А., Милюшите Р., Пожела Ю., Сакалас П., Шальгис Р. // Лит. физ. сб. 1987. Т. 27. № 5. С. 511—521.
- [7] Weinreb S. // IEEE Trans. MTT. 1980. V. MTT-28. N 10. P. 1044—1054.
- [8] Аитов Р. Д., Маслов А. И., Ржевкин К. С. // Матер. III Всес. конф. «Флуктуационные явления в физических системах». Вильнюс, 1983. С. 67—69.