

ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ШУМЫ В ГРЕЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Ашмонтас С., Валушис Г., Либерис Ю., Субачюс Л.

Приведены результаты исследования полевых зависимостей шумовой температуры в компенсированном n -InSb в поперечном и продольном электрическому полю направлениях. Установлено, что в образцах, в которых наблюдается эффект охлаждения электронов в греющих СВЧ электрических полях, при $T_0=80$ К в скрещенном электрическом и магнитном полях с ростом индукции магнитного поля происходит увеличение поперечной шумовой температуры. Этот факт объясняется влиянием магнитного поля на эффект охлаждения электронного газа. На возникновение этого эффекта в компенсированном InSb указывают и представленные в работе результаты исследований полевых зависимостей продольной шумовой температуры при различных температурах кристаллической решетки. Обсуждается влияние флуктуационного потенциала дна зоны проводимости на величину измеряемой поперечной шумовой температуры.

В работе [1] представлены результаты исследования шумовой температуры в компенсированном n -InSb<Cr>, где было показано, что с уменьшением концентрации свободных носителей заряда шумовая температура уменьшается, а в высокоомных образцах, когда $n_0 < 2 \cdot 10^{11}$ см⁻³, в электрических полях $E < 100$ В/см измеряемый дополнительный шум не наблюдается, т. е. шумовая температура равна температуре кристаллической решетки T_0 . Наблюдаемое резкое уменьшение шумовой температуры с уменьшением концентрации электронов было объяснено существованием эффекта охлаждения электронного газа в греющих электрических полях, ранее теоретически предсказанного в работе [2] и позже экспериментально обнаруженного в работах [3, 4]. Если в [1] были приведены данные исследований только продольной шумовой температуры $T_{ш}^{\parallel}$ при $T_0=78$ К, то в настоящей работе представлены как результаты измерений поперечной шумовой температуры, так и результаты исследования $T_{ш}^{\perp}$ при различных температурах кристаллической решетки в компенсированном n -InSb<Cr>.

Исследуемым материалом, как и в работе [1], служил высокоомный монокристалл компенсированного InSb с примесью хрома, концентрация ионизованных примесей в котором $N_I \approx 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³, а подвижность носителей заряда $\mu \approx 25$ м²/В·с (образцы 1 и 2). Для сравнения результатов мы также измеряли поперечную шумовую температуру в антимиониде индия с меньшей концентрацией примесей и подвижностью электронов $\mu \approx 42$ м²/В·с (образец 3). Шумовая температура определялась из величины измеряемого абсолютного значения мощности шумового излучения на частоте 10 ГГц при приложении импульсов постоянного электрического поля по методике, описанной в [5].

На рис. 1 представлены результаты измерения полевых зависимостей поперечной шумовой температуры $T_{ш}^{\perp}$ в скрещенных электрическом и магнитном полях в антимиониде индия с большей подвижностью электронов (рис. 1, а) и в компенсированном n -InSb<Cr> (рис. 1, б). На этом же рисунке для сравнения штриховой линией показана полевая зависимость продольной шумовой температуры $T_{ш}^{\parallel}$. Видно, что с увеличением напряженности электрического поля как в образце 3, так и в образце 1 $T_{ш}^{\perp}$ увеличивается. Однако при приложении магнитного поля характер зависимостей $T_{ш}^{\perp}$ от индукции магнитного

поля B в указанных образцах сильно различается. Если в образце 3 поперечная шумовая температура уменьшается с увеличением B из-за уменьшения подвижности носителей, то в компенсированном n - InSb (образец 1) эти зависимости носят совсем другой характер (рис. 1, б): с увеличением индукции магнитного поля шумовая температура сначала увеличивается, достигает насыщения, а потом начинает уменьшаться. Поскольку в образце 3 из-за отсут-

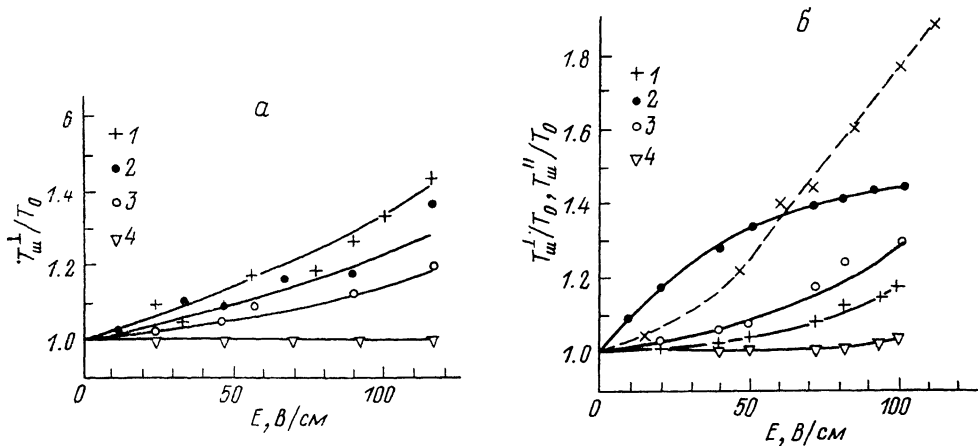


Рис. 1. Полевые зависимости поперечной шумовой температуры в образце 3 с концентрацией электронов $7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, подвижностью $42 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (а) и в образце 1 с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, подвижностью $25 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (б) при различных значениях индукции магнитного поля.

$B, \text{ Т}: 1 - 0, 2 - 0.015, 3 - 0.03, 4 - 0.05$. Штриховая линия — полевая зависимость продольной шумовой температуры в образце 1 при $B=0 \text{ Т}$. $T_0=80 \text{ К}$.

ствия необходимого количества примесей для локализации электронов на дне зоны проводимости эффект охлаждения не наблюдался [6], а в образцах 1, 2 он имел место [3, 4], наблюдаемое различие полевых зависимостей $T_{\text{ш}}^{\perp}$ в магнитных полях можно объяснить влиянием магнитного поля на эффект охлаждения электронов. Согласно работе [8], под действием силы Лоренца в магнитном поле траектория движения электронов искривляется и тем самым уменьшается эмиссия оптических фононов, что способствует исчезновению эффекта охлаждения электронов, поэтому в слабых магнитных полях наблюдается увеличение разогрева электронного газа. При дальнейшем увеличении

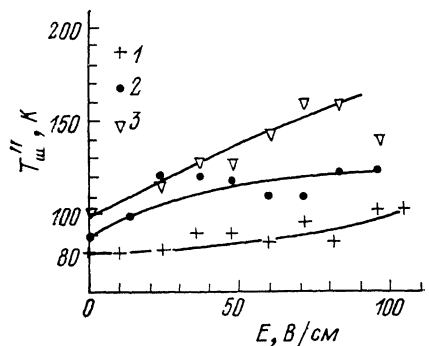


Рис. 2. Полевые зависимости продольной шумовой температуры в образце 2 с концентрацией электронов $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($T_0=80 \text{ К}$) при различных температурах кристаллической решетки.

$T_0, \text{ К}: 1 - 80, 2 - 90, 3 - 100$.

магнитной индукции разогрев электронов начинает уменьшаться из-за уменьшения их подвижности, и, когда $B > 0.05 \text{ Т}$, $T_{\text{ш}}^{\perp}$ почти не зависит от E и равна температуре кристаллической решетки. Однако значения $T_{\text{ш}}^{\perp} < T_0$ не наблюдались. Причиной этого, на наш взгляд, может быть дополнительный шум, возникающий из-за обтекания током рельефа дна зоны проводимости, который характерен для сильно компенсированного $\text{InSb}(\text{Cr})$ [7], т. е. измеряемая поперечная шумовая температура из-за обтекания током барьеров будет содержать определенную долю продольной шумовой температуры, которая, как видно из рис. 1, б, при $B=0 \text{ Т}$ превышает $T_{\text{ш}}^{\perp}$. Вследствие этого экспериментально измеряемая полевая зависимость поперечной шумовой темпе-

ратуры не имеет участка насыщения, как это следует из теоретической работы [8], а плавно увеличивается с ростом E .

О наличии эффекта охлаждения электронного газа в компенсированных образцах n -InSb<Cr> свидетельствуют и измерения продольной шумовой температуры при различных температурах кристаллической решетки. Результаты измерений $T_{ш}^n$ в высокоомном образце 2 представлены на рис. 2. Сопоставляя полученные температурные зависимости $T_{ш}^n$ с результатами работы [4], можно заключить, что с увеличением T_0 разогрев электронного газа увеличивается из-за увеличения концентрации носителей заряда, которое приводит к росту интенсивности межэлектронного взаимодействия, вследствие чего локализации электронов на дне зоны проводимости не происходит и эффект охлаждения не возникает [4].

Таким образом, измерения полевых зависимостей продольной и поперечной шумовой температур в компенсированном в n -InSb<Cr> указывают на ряд особенностей, которые возникают в условиях существования эффекта охлаждения электронного газа в греющих электрических полях при наличии потенциального рельефа дна зоны проводимости.

В заключение авторы выражают глубокую признательность В. Аникявичюсу за всестороннюю помощь при проведении эксперимента.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ашмонтас С., Валушис Г., Либерис Ю., Субачюс Л. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 12. С. 2114—2116.
- [2] Грибников Э. С., Кочелап В. А. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. В. 3. С. 1046—1056.
- [3] Ашмонтас С. П., Пожела Ю. К., Субачюс Л. Е. // Письма ЖЭТФ. 1981. Т. 33. В. 11. С. 580—583.
- [4] Ашмонтас С. П., Субачюс Л. Е. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 40—47.
- [5] Барейкис В., Катилкус Р., Милюшите Р. Флуктуационные явления в полупроводниках в неравновесных условиях. Вильнюс, 1989. 220 с.
- [6] Субачюс Л. Е. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1434—1437.
- [7] Гальперин Ю. М., Гершензон Е. М., Дричко И. Л., Литвак-Горская Л. Б. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 1. С. 3—24.
- [8] Захлепюк Н. А., Кочелап В. А., Митин В. В. // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. В. 4. С. 1495—1511.

Институт физики полупроводников
АН Литвы
Вильнюс

Получена 22.05.1991
Принята к печати 19.06.1991