

## 1/f-ШУМ ДИСКОВ КОРБИНО ИЗ InSb В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Алекперов С. А., Кенгерли Д. Ф.

Проведены измерения спектральной плотности шума дисков Корбино и образцов холловской геометрии из InSb при 80 К в зависимости от частоты  $(3\div 2) \cdot 10^4$  Гц и индукции поперечного магнитного поля  $B$  ( $0\div 1.05$  Т). Обнаружено, что параметр 1/f-шума  $\alpha$  возрастает с увеличением  $B$  и крутизна зависимости  $\alpha(B)$  уменьшается с увеличением концентрации примеси. Показано, что зависимость  $\alpha(B)$  возникает за счет вклада источников 1/f-шума, находящихся в объеме, а различное ее поведение в сильных магнитных полях в образцах холловской геометрии и дисках Корбино обусловлено отсутствием в последних холловского напряжения.

В работе [1] исследовалось влияние поперечного магнитного поля на 1/f-шум дисков Корбино из GaAs в слабых магнитных полях ( $\mu B \leq 1$ ) при 300 К, а в работе [2] аналогичные измерения проведены на образцах GaAs, геометрические размеры которых обуславливали появление сильного геометрического магнитосопротивления. Отсутствие зависимости относительной спектральной плотности 1/f-шума  $S_U/U^2$  от индукции поперечного магнитного поля  $B$  и внешних воздействий на поверхность авторы объясняли преобладанием вклада флуктуаций концентрации носителей тока, происходящих в объеме. Влияние поперечного магнитного поля на 1/f-шум в образцах холловской геометрии из InSb при 77 К исследовано в работе [3]. По мнению авторов, резкое увеличение  $S_U/U^2$  при изменении  $B$  от 0.03 до 2 Т ( $\mu B \gg 1$ ) обусловлено флуктуациями подвижности носителей тока, хотя из результатов работы следует, что в отсутствие магнитного поля уровень 1/f-шума зависит от состояния поверхности.

В настоящей работе показано, что в сильных магнитных полях ( $\mu B \gg 1$ ) относительная спектральная плотность 1/f-шума дисков Корбино, так же как и образцов холловской геометрии из InSb, при 80 К возрастает с увеличением индукции поперечного магнитного поля за счет вклада объемных источников шума.

С целью изучения влияния на 1/f-шум геометрического магнитосопротивления исследовались образцы, изготовленные в виде дисков Корбино (Д) и в виде образцов холловской геометрии (О). Диаметр дисков варьировался в пределах от 6 до 12 мм при толщине от 50 до 100 мкм. Для измерения шума дисков четырехзондовым методом между центральным точечным (диаметр  $1\div 2$  мм) и крайним кольцевым контактами на расстоянии 1 мм друг от друга наносились еще два кольцевых контакта. Измеряемая область образцов холловской геометрии имела размеры  $(5\div 8) \times (0.5\div 1) \times (0.05\div 0.2)$  мм. Операции обработки поверхности и нанесения контактов проводились аналогично описанным в работе [4].

Приклеенные к сапфировым подложкам образцы помещались в измерительный кристалл, который жестко закреплялся в зазоре между полюсами электромагнита. Для устранения внешних наводок и нестабильности магнитного поля питание электромагнита осуществлялось от аккумулятора, а исследуемый шумовой сигнал усиливался предварительным усилителем с дифференциальным входом и коэффициентом подавления синфазных помех не менее 100 дБ. Гармо-

нический анализ напряжения шума проводился в диапазоне частот  $(3 \div 2) \times 10^4$  Гц. Погрешность измерения  $S_U/U^2$  не превышала 20 %.

Значения концентрации и подвижности носителей тока определялись как на исходном материале, так и непосредственно на готовых образцах. В дисках Корбино эти параметры определялись путем измерения зависимости сопротивления  $R_B$  от  $B$  в слабых магнитных полях.

Количественная оценка уровня  $1/f$ -шума проводилась по параметру Хоуге  $\alpha$  [5], согласно выражению

$$\alpha = \frac{S_U}{U^2} N f, \quad (1)$$

где  $f$  — частота,  $N$  — число носителей тока в образце.

Измерения показали, что независимо от полярности при значениях напряженности электрического поля  $E \ll (1 \div 2)$  В/см в диапазоне изменения  $B$  от 0

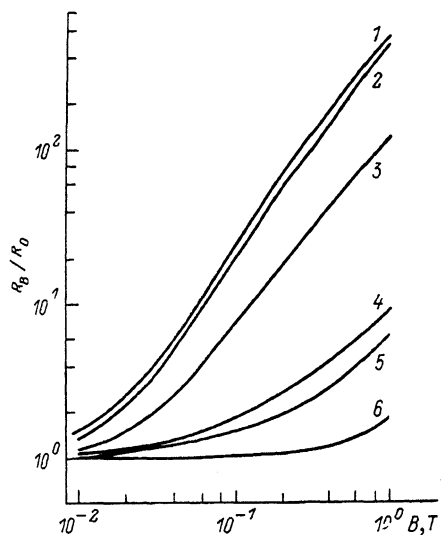


Рис. 1. Зависимость  $R_B/R_0$  от  $B$ .

Диски: 1 — Д6, 2 — Д1, 3 — Д7, 4 — Д8, 6 — Д3; 5 — образец холловской геометрии 017.  $\mu_0 \cdot 10^{-5}$ , см<sup>2</sup>/В·с: 1, 5 — 6.9, 2 — 5.6, 3 — 3.8, 4 — 1.9;  $\mu_{p0} \cdot 10^{-3}$ , см<sup>2</sup>/В·с: 6 — 9.1.  $n_0 \cdot 10^{-13}$ , см<sup>-3</sup>: 1 — 8.1, 2 — 24, 3 — 1.8, 4 — 0.082, 5 — 8.3;  $p_0 \cdot 10^{-13}$ , см<sup>-3</sup>: 6 — 8.6.

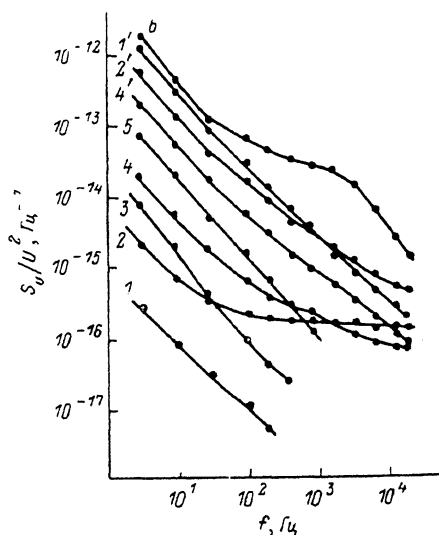


Рис. 2. Зависимость  $S_U/U^2$  от  $B$ .

$B$ , Т: 1, 2, 4, 6 — 0, 1', 2', 3, 4', 5 — 0.95. 1, 1' — 0.17, 2, 2' — 0.11, 3 — Д1, 4, 4' — Д7, 5 — Д6, 6 — Д3. Для 011 —  $\mu_0 = 3.9 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с,  $n_0 = 2.3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

до 1.05 Т вольтамперные характеристики исследуемых образцов линейны, а зависимости  $S_U$  от  $U$  близки к квадратичным и слабо различаются при изменении направления  $B$  или  $E$ .

На рис. 1 приведены зависимости  $R_B/R_0$  от индукции поперечного магнитного поля ряда образцов.

Как видно из рисунка,  $R_B/R_0$  диска Д6 ( $\mu_0 = 6.9 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/В·с) с ростом  $B$  увеличивается примерно в 600 раз (кривая 1). По мере уменьшения  $\mu_0$  зависимость  $R_B/R_0$  от  $B$  становится слабее (кривые 2—4, 6) и у диска Д3, изготовленного из материала  $p$ -типа ( $\mu_{p0} = 9.1 \cdot 10^8$  см<sup>2</sup>/В·с), максимальное изменение сопротивления не превышает 1.8. Сопротивление образца 017, имеющего такую же подвижность, как и у Д6, возрастает в 6.7 раза. При значениях  $B$  0.61, 0.78 и 1.01 Т на зависимости  $R_B/R_0$  от  $B$  этого образца наблюдались небольшие (практически незаметные в логарифмическом масштабе) максимумы, соответствующие магнитофонному резонансу [6]. Такое поведение зависимости  $[R_B/R_0](B)$  достаточно хорошо описывается изменением подвижности при учете влияния рассеяния носителей тока на полярных оптических фононах и ионизированных примесях [7]. Таким образом, изменение сопротивления исследуемых образцов в поперечном магнитном поле ( $B \ll 1.05$  Т) определяется объемными процессами.

На рис. 2 приведены частотные зависимости  $S_V/U^2$  образцов, измеренные при  $B=0$  (кривые 1, 2, 4, 6) и в поперечном магнитном поле ( $B=0.95$  Т) (кривые 1', 2', 3, 4', 5). Ввиду очень низкого уровня шума и относительно большого объема при  $B=0$  оказалось возможным измерение шума дисков, изготовленных только из компенсированного материала ( $n_0 < 3 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ) и материала  $p$ -типа.

Как видно из рис. 2, в спектре шума образцов, имеющих высокую подвижность  $\mu_0$ , не наблюдается каких-либо существенных отклонений от закона  $1/f$  независимо от наличия или отсутствия магнитного поля (кривые 1, 1', 3, 5). У образцов из компенсированного материала с повышением частоты крутизна зависимости  $S_V/U^2$  от  $f$  уменьшается (кривые 2, 4), что, по-видимому, связано с вкладом генерационно-рекомбинационного шума. При  $B=0.95$  Т вклад этого шума значительно меньше (кривые 2', 4'). У диска ДЗ наблюдается значитель-

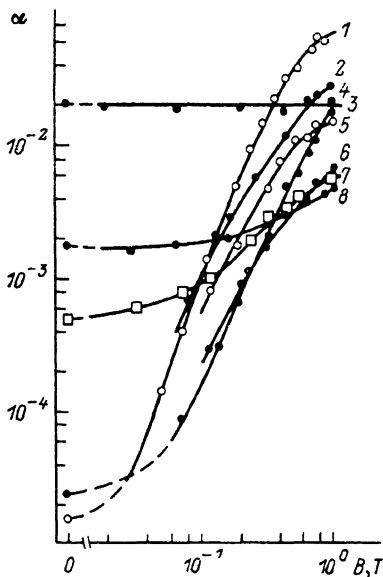


Рис. 3. Зависимость  $\alpha(B)$ .

1 — 017, 2 — Д6, 3 — ДЗ, 4 — 013, 5 — Д2,  
6 — Д1, 7 — Д7, 8 — Д8.  $\mu_0 \cdot 10^{-5}$ , см $^2$ /В·с:  
4 — 5.6, 5 — 6.8;  $n_0 \cdot 10^{-14}$ , см $^{-3}$ : 4 — 2.2,  
5 — 1.2.

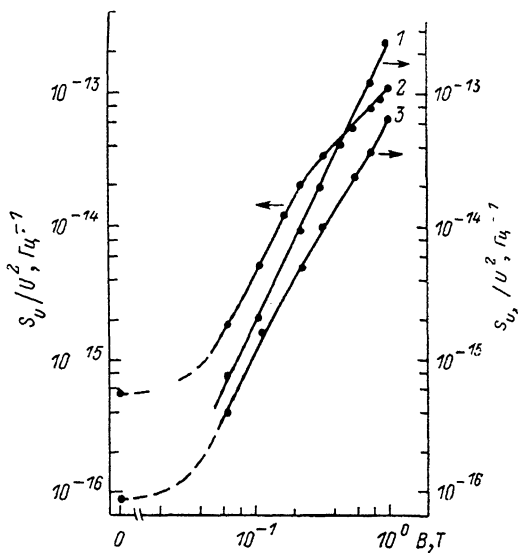


Рис. 4. Зависимости  $S_{U_X}/U^2$  от  $B$  и  $S_V/U^2$  от  $B$ .

1 — 017, 2, 3 — 011.

ная компонента генерационно-рекомбинационного шума с временем жизни дырок порядка  $3 \cdot 10^{-5}$  с, а значения  $S_U/U^2$  в нем не зависят от  $B$  во всем исследуемом частотном диапазоне (кривая 6).

На рис. 3 приведены зависимости параметра  $\alpha$  от  $B$ , вычисленные из результатов измерений  $R_X$  и  $S_V/U^2$  на частоте 10 Гц. Видно, что при  $B=0$  значения  $\alpha$  порядка  $(1 \div 2) \cdot 10^{-5}$  наблюдаются в образцах холловской геометрии с высокой подвижностью  $\mu_0$ . Можно ожидать, что значения  $\alpha$  такого же порядка имеют место и в дисках Д1 и Д6. В этих образцах, так же как и в исследованных в работе [3], наблюдается сильная зависимость  $\alpha(B)$ . При  $B \leq 0.2$  Т характер этой зависимости приблизительно одинаков в образцах холловской геометрии и дисках Корбино, имеющих близкие значения концентрации и подвижности носителей тока. При более высоких значениях  $B$  крутизна зависимости  $\alpha(B)$  дисков несколько меньше, чем образцов холловской геометрии. По мере уменьшения подвижности  $\mu_0$  зависимость  $\alpha(B)$  становится менее выраженной и в образцах  $p$ -типа практически отсутствует. Вместе с тем с уменьшением  $\mu_0$  увеличивается значение  $\alpha$  при  $B=0$ .

На рис. 4 приведены зависимости отношения спектральной плотности флуктуаций холловского напряжения к квадрату «продольного» напряжения  $S_{U_X}/U^2$  от  $B$  образцов 011 и 017, измеренные на частоте 10 Гц (кривые 1, 2). Кривая 2 представляет собой зависимость  $S_V/U^2$  от  $B$  образца 011.

Из рис. 3 и 4 видно, что в сильных магнитных полях зависимость  $S_{V_x}/U^2$  от  $B$  более резкая, чем зависимостью  $S_V/U^2$  от  $B$ , и значения  $S_{V_x}/U^2$  и  $S_V/U^2$  сближаются.

Аналогично результатам, полученным в работах [3, 8], уровень  $1/f$ -шума, снимаемого с холловских контактов, оказывался отличным от нуля даже при  $B=0$  и его спектральная плотность пропорциональна квадрату «продольного» напряжения. Можно предположить, что при наличии холловского напряжения его флуктуации оказывают влияние и на «продольную» компоненту шума, а поскольку зависимость  $S_{V_x}/U^2$  от  $B$  более крутая, чем  $S_V/U^2$  от  $B$ , следует ожидать, что это влияние будет увеличиваться с ростом  $B$ . Но в дисках Корбино холловское напряжение отсутствует. Этим, по-видимому, и обусловлено различное поведение зависимости  $\alpha(B)$  дисков Корбино и образцов холловской геометрии.

В работах [3, 4] показано, что при 80 К в отсутствие магнитного поля в формировании  $1/f$ -шума в InSb значительную роль играют поверхностные источники. Вместе с тем вклад в  $1/f$ -шум вносят и флуктуации концентрации носителей тока, происходящие в результате взаимодействия носителей с примесными центрами. Так, в образцах, имеющих одинаковые геометрические размеры, близкие значения концентрации и подвижности носителей тока и прошедших одинаковую обработку поверхности, значения параметра  $\alpha$  различались более чем на порядок [3]. С увеличением концентрации примеси (уменьшением подвижности  $\mu_0$ ) начинают преобладать источники  $1/f$ -шума, связанные с флуктуациями концентрации в объеме [4], и значение па-

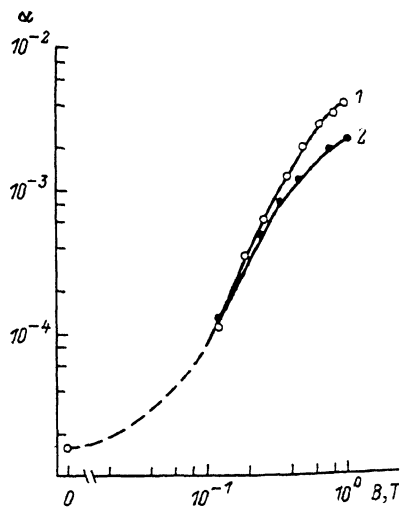


Рис. 5. Зависимость  $\alpha(B)$  образца 017.

1, 2 относятся к двум противоположным направлениям  $B$ .  
Отношение ширины к толщине 9 : 1.

раметра  $\alpha$  возрастает. Увеличение  $\alpha$  с ростом концентрации примеси обнаружено и в  $Cd_xHg_{1-x}Te$  [9].

В образцах из компенсированного материала и материала  $p$ -типа со значениями  $\alpha > 10^{-4}$  в слабых магнитных полях  $1/f$ -шум, так же как и генерационно-рекомбинационный, по-видимому, возникает из-за флуктуаций концентрации носителей в объеме. Можно предположить, что в этих образцах зависимость  $\alpha(B)$  в сильных магнитных полях также имеет объемное происхождение. Однако экспериментальных доказательств возникновения зависимости  $\alpha(B)$  за счет флуктуаций концентрации нами не найдено.

В образцах с высокими значениями  $\mu_0$ , так же как и в исследованных в работах [3, 8], при  $\mu B \leq 1$  существен вклад поверхностных источников  $1/f$ -шума. Так, по мере старения поверхности при ее окислении на воздухе в течение 4–6 месяцев, как правило, увеличивался только уровень  $1/f$ -шума образцов, имеющих значения  $\alpha < 10^{-4}$ . Измерения  $S_V/U^2$  одного из образцов холловской геометрии, проведенные через 2 года и 8 месяцев, показали, что при  $B=0$  значение  $\alpha$  увеличилось от  $8 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-5}$ , а при  $B=0.2$  Т уменьшилось не более чем на 30 %. Отсюда следует, что «избыточный»  $1/f$ -шум, возникающий при приложении поперечного магнитного поля, менее чувствителен к состоянию поверхности.

Если все же предположить, что источником  $1/f$ -шума в InSb в сильных магнитных полях является поверхность, то аналогично работе [2] можно рассмотреть эквивалентную схему, в которой шумящее поверхностное сопротивление  $R_s$  включено параллельно с шумящим объемным сопротивлением  $R_v$  и в слабых магнитных полях  $R_s \gg R_v$ . Тогда

$$\frac{S_V}{U^2} = \left(\frac{\delta R}{R}\right)^2 = \left(\frac{R_v}{R_s + R_v}\right)^2 \left(\frac{\delta R_s}{R_s}\right)^2 = \frac{R_v^2}{R_s^2} \left(\frac{\delta R_s}{R_s}\right)^2. \quad (2)$$

При  $B=1.05$  Т сопротивление дисков возрастает в 600 раз (рис. 1), а  $S_U/U^2$  — в  $10^3$  раз (рис. 3). Поэтому, согласно выражению (2), с ростом  $B$  примерно в 20 раз должно увеличиваться  $(R_s+R_v)^2$  (что не исключает возрастания  $R_s$ ) либо уменьшаться  $(\delta R_s/R_s)^2$ .

В образцах холловской геометрии при  $B=1.05$  Т  $R_B/R_0$  не превышает 7. Тогда для увеличения  $S_U/U^2$  более чем в  $10^3$  раз (рис. 3) необходимо, чтобы с ростом  $B$  либо уменьшалась  $R_s$  либо увеличивалась  $(\delta R_s/R_s)^2$ .

Очевидно, что при тенденции к увеличению  $R_v$  не имеет смысла ожидать какого-либо существенного уменьшения  $R_s$ . Увеличение же  $(\delta R_s/R_s)^2$  возможно за счет изменения темпа рекомбинации на боковых поверхностях, происходящего из-за отклонения носителей к ним под действием силы Лоренца, аналогично тому, как это показано в работе [10]. Из результатов работы [10] следует, что увеличение уровня  $1/f$ -шума имеет место только при значительном отклонении ВАХ от линейности. При этом  $S_U/U^2$  зависит как от произведения  $B \cdot E$ , т. е. одинаковым образом изменяется при одинаковом изменении  $B$  или  $E$ , так и от направления полей, чего в наших экспериментах не наблюдалось. Кроме того, указанные эффекты должны быть более выражены при уменьшении размера образца в направлении действия поля Холла  $E_x$  (в данном случае — ширины).

Для проверки влияния ширины образцов холловской геометрии на  $1/f$ -шум в сильных магнитных полях были проведены измерения  $S_U/U^2$  при направлении магнитного поля, перпендикулярном плоскости, образованной длиной и толщиной (способствующим отклонению носителей к большим поверхностям). В дисках Корбино магнитное поле направлялось параллельно плоскости диска. Измерения показали, что при таком направлении  $B$  в указанном выше диапазоне изменения  $B$  и  $E$  отклонений ВАХ от линейности практически не имеется. В дисках Корбино на всех исследуемых частотах уровень шума не превышал уровня собственных шумов установки [что может свидетельствовать о возможности лишь незначительного увеличения  $(\delta R_s/R_s)^2$ ], а в образцах холловской геометрии зависимость  $\alpha(B)$  оказалась намного слабее, и значения  $\alpha$  в сильных магнитных полях уже зависели от направления  $B$  или  $E$  (рис. 5). В этом случае число носителей тока, отклоняемых к поверхности под действием силы Лоренца, в  $b/d$  ( $b$  — ширина,  $d$  — толщина) раз больше, чем при направлении  $B$ , перпендикулярном плоскости поверхности, образованной длиной и шириной, и, согласно работе [10], должно быть и  $(\delta R_s/R_s)^2$ . Следовательно, взаимодействие носителей тока с поверхностью, усиленное магнитным полем, ведет к ослаблению зависимости  $\alpha(B)$ , и поверхностные источники, по-видимому, не могут быть ответственными за ее возникновение.

Таким образом, наблюдаемая зависимость  $\alpha(B)$  в сильных магнитных полях в дисках Корбино из InSb при 80 К, очевидно, имеет объемное происхождение. Однако вопрос о том, какие именно источники флуктуируют, в данном случае остается нерешенным.

#### Список литературы

- [1] Song M. H., Min H. S. // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. N 7. P. 4221—4224.
- [2] Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 10. С. 1830—1834.
- [3] Vande Voorde P., Love W. F. // Phys. Rev. 1981. V. 24. N 8. P. 4781—4786.
- [4] Алекперов С. А., Гусейнов Н. Я., Каджар Ч. О., Салаев Э. Ю. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 8. С. 1549—1551.
- [5] Hooge F. N. // Physica. 1972. V. 60. N 2. P. 130—144.
- [6] Шалыт С. С., Парфеньев Р. В., Муждаба В. М. // ФТТ. 1964. Т. 6. В. 2. С. 647—649.
- [7] Аскеров Б. М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М., 1985. 320 с.
- [8] Vaes H. M. J., Kleinpenning T. G. M. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. N 12. P. 5131—5134.
- [9] Бакши И. С., Гринь В. Ф., Кравчезцева Л. А., Коладашвили М. З., Сальков Е. А. // Тез. докл. V Всес. конф. «Флуктуационные явления в физических системах». Вильнюс, 1988. С. 123—125.
- [10] Dilmi T., Chovet A., Victorovitch P. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 8. P. 5348—5351.

Получена 25.07.1988  
Принята к печати 13.07.1989