

©1994 г.

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКООМНОГО $n$ -InSb ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

И.Л. Дричко, В.В. Попов

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 29 декабря 1993 г. Принята к печати 13 января 1994 г.)

Проведено исследование инверсных и аккумулирующих слоев на поверхности монокристаллического высокоомного  $n$ -InSb, легированного хромом и марганцем, в магнитных полях до 30 кЭ при низких температурах (1.5–20 К), где проводимость по поверхности является основной. Определены концентрации носителей в поверхностных слоях  $n$ - и  $p$ -типа. Обнаружено, что в этих слоях наблюдается отрицательное магнитосопротивление, величина которого зависит от ориентации магнитного поля относительно поверхности образца и от ИК подсветки. Определено, что поверхностная проводимость  $n$ -типа, не влияющая на распространение звуковых волн внутри объема образца, ухудшает генерацию ультразвуковых волн из-за сильной зависимости сопротивления поверхностного слоя от магнитного поля. Предложен метод введения ультразвуковых волн в образец в этом случае.

### Введение

При изучении гальваномагнитных свойств  $n$ -InSb, легированного хромом и марганцем (цинком) [1–3], наблюдались аномальные зависимости эффекта Холла от магнитного поля, причина которых поначалу связывалась с прыжковой проводимостью по глубоким уровням хрома. В работе [4] было показано, что указанные аномалии в  $n$ -InSb при  $T = 77$  К могут быть объяснены наличием на образце низкоомного поверхностного слоя с инверсной проводимостью, причем проведенные расчеты для двуслойной модели показали, что концентрация дырок в этом слое, пересчитанная на объем,  $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. В настоящее время установлено [5], что подобное легирование  $n$ -InSb позволяет полностью компенсировать мелкие донорные уровни, поэтому наличие свободных носителей в объеме определяется активацией электронов в зону проводимости с примесных уровней хрома (энергия активации  $\sim 70$  мэВ [6]).

Для определения и разделения механизмов проводимости при низких температурах очень плодотворными могут быть акустические методы, не требующие электрических контактов и позволяющие выделить объемную проводимость, так как на звуковые волны, распространяющиеся внутри объема, поверхностная проводимость влияния не оказывает. Поглощение пьезоактивных акустических волн носителями тока определяется кинетическими характеристиками последних [7,9], поэтому эти исследования дают возможность определять характер проводимости носителей тока: по зоне проводимости или по примесной зоне (прыжковый) [9]; определять характер локализации электронов: на отдельных примесях или во флуктуационном потенциале многих заряженных примесей [10] и разделять вклады в поглощение от разных механизмов проводимости в том случае, если они осуществляются одновременно [11]. Акустические методы позволяют определять концентрацию носителей тока и их подвижность, а также характеристики примесной зоны и локализованных носителей [12].

В результате исследований поглощения ультразвуковых волн электронами в магнитном поле в  $n$ -InSb, легированном хромом и марганцем, было показано [13], что основным механизмом объемной проводимости в этом материале при  $T > 60$  К является зонный. Объемной прыжковой проводимости в температурном интервале 4.2–60 К обнаружено не было. Ниже  $T = 60$  К концентрация электронов в зоне становится менее  $10^{10}$  см<sup>-3</sup> из-за вымораживания электронов на примесные уровни хрома. При дальнейшем понижении температуры ожидается полное вымораживание свободных носителей, так что проводимость объема должна быть близка к диэлектрической. Таким образом, можно считать, что проводимость  $n$ -InSb (Cr, Mn) при низких температурах ( $T < 60$  К), измеренная на постоянном токе, будет осуществляться лишь проводимостью по поверхности.

Следует обратить внимание на то, что поверхностная проводимость, не влияющая на распространение звуковых волн внутри объема, может влиять на эффективность генерации ультразвука пьезообразователем. Данная работа посвящена изучению поверхностной проводимости в  $n$ -InSb, легированном хромом и марганцем, и ее роли в гальваномангнитных и акустических измерениях.

## Экспериментальные результаты

Было проведено исследование поверхностной проводимости инверсных и аккумулирующих слоев на поверхности монокристаллического  $n$ -InSb при  $T = 1.5$ –100 К в магнитных полях до 30 кЭ. Антимонид индия выбирался с большим объемным сопротивлением, что достигалось легированием его примесями хрома и марганца в определенных пропорциях. Объемные электрические свойства образцов определялись с помощью акустических измерений, на которые поверхностная проводимость не влияет. При  $T = 77$  К была определена концентрация носителей  $n = 3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> и обнаружена зависимость  $\Delta\rho(H)/\rho_0 = 1.7 \cdot 10^{-3} H[\text{Э}]$ .

1. Известно [4], что инверсный слой с воспроизводимыми свойствами в  $n$ -InSb создается после травления в травителе типа CP-4А исходного образца, вырезанного из слитка электроискровой резкой, с после-

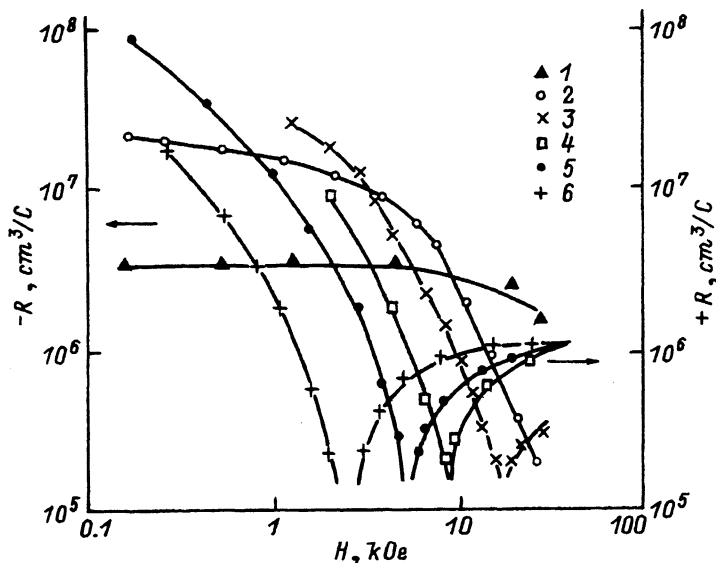


Рис. 1. Зависимость коэффициента Холла  $R$  в образце  $n$ -InSb с инверсным слоем от напряженности магнитного поля при температурах  $T$ , К: 1 — 91.9, 2 — 77.3, 3 — 71, 4 — 64.7, 5 — 59.8, 6 — 52.9.

дующей выдержкой на воздухе не менее суток. Коэффициент Холла  $R$  для травленого образца в зависимости от магнитного поля для разных температур представлен на рис. 1. Как видно из рисунка, коэффициент Холла в слабых магнитных полях имеет знак, соответствующий  $n$ -типу проводимости, затем уменьшается по величине и при некотором значении  $H$  меняет знак. При низких температурах (ниже 71 К) величины  $R(H)$  после смены знака в магнитном поле сходятся к одному предельному значению  $R_{\text{lim}} = +6 \cdot 10^5 \text{ см}^3/\text{Кл}$ . Смена знака хорошо объясняется, если предположить, что в общую величину  $R(H)$  вносят вклад как электроны из зоны проводимости (объемная проводимость), так и дырки, осуществляющие проводимость в поверхностном инверсном слое. С ростом магнитного поля и при понижении температуры роль поверхностной проводимости возрастает, а при  $T < 50 \text{ К}$  становится определяющей. Из значения коэффициента Холла  $R_{\text{lim}}$  можно оценить концентрацию дырок на поверхности  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Необходимо заметить, что концентрация носителей в объеме, определенная из акустических измерений, совпадает с концентрацией, определенной из константы Холла при  $T = 77 \text{ К}$ , лишь в магнитных полях до 1000 Э, а при  $T = 91.9 \text{ К}$  — до 6000 Э. Это еще раз свидетельствует о том, что вклад поверхностной проводимости в эффект Холла растет с понижением температуры и при увеличении магнитного поля.

На рис. 2 представлена зависимость  $\Delta\rho/\rho_0$  при  $T = 20 \text{ К}$  на этом же образце в том случае, когда сопротивление определяется целиком поверхностной проводимостью. На рисунке видно наличие участка отрицательного магнитосопротивления (ОМС) при  $H < 3 \text{ кЭ}$ . Положительная составляющая магнитосопротивления квадратично зависит от магнитного поля, что соответствует теории при условии  $\mu H/c \ll 1$ . На вставке к рисунку представлено ОМС после вычитания из кривой 1

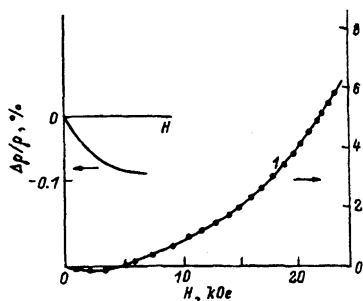


Рис. 2. Зависимость относительного изменения сопротивления  $\Delta\rho/\rho$  от напряженности магнитного поля в образце  $n$ -InSb с инверсным поверхностным слоем,  $T = 20.1$  К. У левой шкалы показано ОМС, полученное вычитанием из кривой 1 квадратичного по магнитному полю положительного магнитосопротивления.

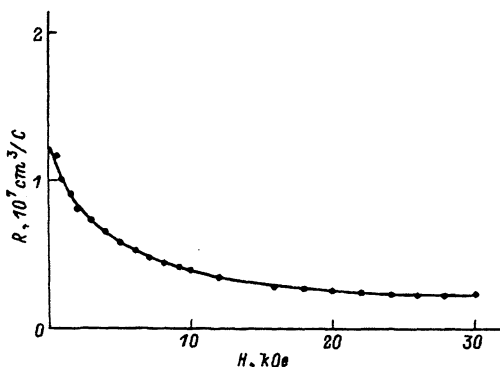


Рис. 3. Зависимость коэффициента Холла от напряженности магнитного поля при  $T = 77$  К в образце  $n$ -InSb с аккумуляющим слоем.

квадратичного по магнитному полю фона. Величина ОМС не превышает 0.1 %.

2. Аккумуляющий слой на поверхности образцов  $n$ -InSb образуется при шлифовке и оптической полировке его граней. Толщину этого слоя можно считать, по-видимому, порядка наибольшей величины зерна порошка, используемого при обработке поверхности. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента Холла  $R$  от магнитного поля при  $T = 77$  К для того же образца  $n$ -InSb (который прежде был с инверсным слоем) после шлифовки и оптической полировки всех граней. Эта зависимость отличается от представленной на рис. 1 тем, что знак  $R$  при всех значениях магнитного поля соответствует  $n$ -типу проводимости. Для определения концентрации электронов в этом аккумуляющем слое проведем простой расчет. Согласно общей теории явлений переноса гальваномагнитные коэффициенты  $R(H)$  и  $\rho(H)$  определяются соотношениями

$$R(H) = \frac{\sigma_{xy}}{H(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2)}, \quad (1)$$

$$\rho(H) = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} = \rho_{xx}. \quad (2)$$

При параллельном включении сопротивления поверхностного слоя и объема можно ввести тензор средней проводимости

$$\bar{\sigma}_{xy}(H) = \sigma_{xy}^c(H) \frac{d_1}{d} + \sigma_{xy}^s(H) \frac{d_2}{d}, \quad (3)$$

где индексы  $c$  и  $s$  соответствуют зонной (объемной) и поверхностной проводимостям соответственно,  $d$  — толщина образца,  $d_2$  — толщина поверхностного слоя, причем  $d_1 + d_2 = d$ ,  $d_2 \ll d$ . Для среднего коэффициента Холла  $\bar{R}$  при условии  $\sigma_{xx} \ll \sigma_{xy}$ , выполняющемся в сильном

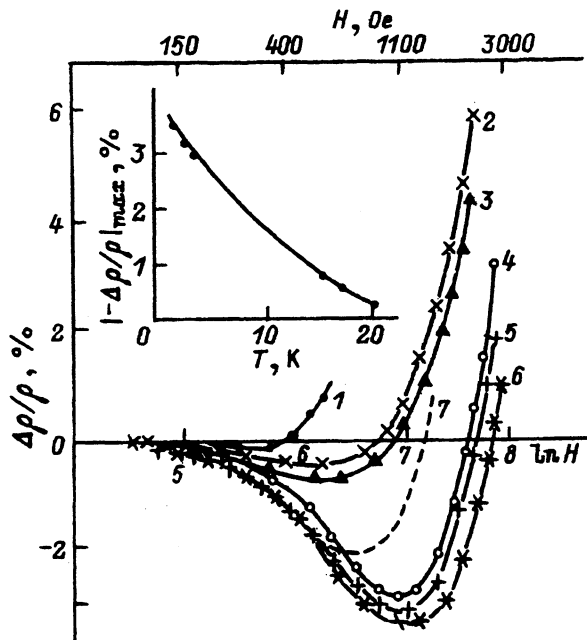


Рис. 4. Зависимость относительного изменения сопротивления от напряженности магнитного поля для образца  $n$ -InSb с аккумулярующим слоем при температурах  $T$ , К: 1 — 20, 2 — 17.1, 3 — 15.2, 4 — 4.2, 5 — 3.2, 6 — 2.1, 7 — 2.1 с ИК подсветкой.

магнитном поле, имеем соотношение

$$\bar{R} = \frac{1}{H\bar{\sigma}_{xy}} = \frac{1}{H\left(\sigma_{xy}^c(H)\frac{d_1}{d} + \sigma_{xy}^s(H)\frac{d_2}{d}\right)}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{\bar{R}} = \frac{1}{R^c} \left(\frac{d_1}{d}\right) + \frac{1}{R^s} \left(\frac{d_2}{d}\right). \quad (5)$$

Зная концентрацию электронов в объеме  $n = 2.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  ( $R^c = 2.7 \cdot 10^7 \text{ см}^3/\text{Кл}$ ), можно из значения  $\bar{R} = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^3/\text{Кл}$  в максимальном магнитном поле (см. рис. 3) определить величину  $R^s/d_2$  по формуле (5), которая оказалась равной  $5 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Кл}$ , что соответствует концентрации электронов в аккумулярующем слое  $\sim 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 4 представлено магнитосопротивление в слабых магнитных полях при разных температурах в образце с аккумулярующим слоем. Как видно из рисунка, здесь также наблюдается ОМС. На вставке к рисунку представлена температурная зависимость величины  $\Delta\rho/\rho$ , соответствующая минимуму ОМС, в зависимости от температуры. Измерения показывают, что характер ОМС зависит от ориентации магнитного поля относительно поверхности образца и от ИК подсветки от светодиода (рис. 4, кривая 7).

### Роль поверхностной проводимости при акустических измерениях

Обычно для введения акустических волн в диэлектрик пьезопреобразователи (из кварца или ниобата лития) приклеиваются к плоскопараллельным оптически полированным торцам образца, на которые

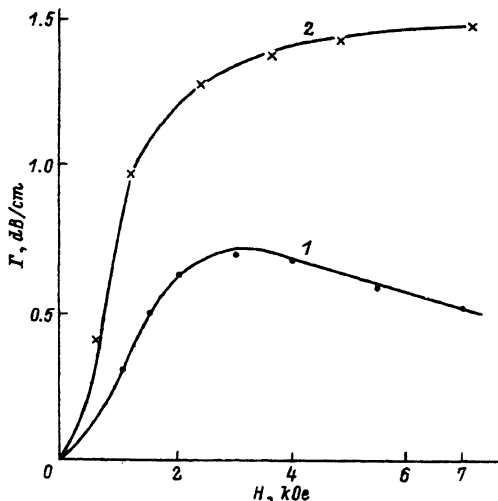


Рис. 5. Зависимость коэффициента поглощения ультразвука  $\Gamma$  от напряженности магнитного поля при  $T = 77$  К,  $f = 400$  МГц: 1 — на образце с буфером, истинное поглощение; 2 — на образце без буфера, «псевдопоглощение».

предварительно наносится слой металла для надежного заземления. При этом на другую поверхность пьезопреобразователя подается радиочастотный импульс. Однако при исследовании полупроводниковых образцов не всегда возможно нанести металлическое покрытие, поэтому при работе с материалом с достаточно высокой электропроводностью часто пьезопреобразователь приклеивается непосредственно к полированному торцу измеряемого образца, а сам образец плотно прижимается к заземленному корпусу прибора. При исследовании поглощения ультразвуковых волн в зависимости от магнитного поля в образцах с большим сопротивлением объема такой стандартный метод оказался неприменим. Как было показано выше, при шлифовке и полировке поверхности образца  $n$ -InSb на поверхности образуется слой  $n$ -типа проводимости с концентрацией  $\sim 10^{12}$  см $^{-2}$ , сопротивление которого зависит от магнитного поля. Это сопротивление оказывается включенным последовательно с пьезопреобразователем в электрической цепи, питающейся от радиочастотного генератора. При росте напряженности магнитного поля сопротивление слоя растет, электрическое напряжение на нем возрастает, а на пьезопреобразователе падает, ухудшая тем самым эффективность генерации звука. Если поглощение звука в магнитном поле измеряется по изменению амплитуды одного из следующих друг за другом «эхоимпульсов», то изменение эффективности генерации звука в магнитном поле может быть принято за его поглощение. Это «псевдопоглощение» может быть значительно больше по величине истинного электронного поглощения (рис. 5, кривая 2).

Для устранения этого эффекта звуковые волны вводятся в образец через буфер. В качестве буфера удобно использовать тонкую стеклянную пластинку, с одной стороны которой напылена металлическая пленка. Пьезопреобразователь приклеивается на буфер со стороны надежно заземленной металлической пленки, а образец, приклеенный с другой стороны буфера, оказывается лишь механически связанным с пьезопреобразователем. Электрические характеристики образцов, определенные акустическими методами в [13] и используемые в этой

работе, были получены при запуске ультразвуковых волн в образец через буфер. На рис. 5 представлены результаты по поглощению ультразвука в зависимости от напряженности магнитного поля, полученные при запуске ультразвука в один и тот же образец с буфером и без буфера. Как видно из рисунка, величина и характер поглощения ультразвука, измеренного на образце с буфером и без буфера, сильно отличаются.

## Выводы

1. При исследовании поглощения ультразвуковых волн в проводящих кристаллах в зависимости от магнитного поля необходимо убедиться, что магнитное поле не влияет на генерацию звука.

2. При травлении образца  $n$ -InSb травителем CP-4A на поверхности образуется слой  $p$ -типа с концентрацией дырок  $p \sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Этот слой является причиной аномальных зависимостей эффекта Холла от магнитного поля в травленых образцах  $n$ -InSb, легированных хромом и марганцем (цинком).

3. При шлифовке и оптической полировке образца  $n$ -InSb на поверхности возникает нарушенный слой, который имеет  $n$ -тип проводимости с  $n \sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

4.  $n$ -InSb, легированный хромом и марганцем (цинком), является весьма удобным объектом для изучения поверхностных состояний при низких температурах, так как зонные электроны, определяющие процессы переноса в объеме, при  $T < 50 \text{ К}$  вымораживаются и поверхностная проводимость остается единственным механизмом проводимости на постоянном токе.

5. В изученных в этой работе поверхностных слоях  $n$ - и  $p$ -типа наблюдается ОМС, величина которого зависит от ориентации магнитного поля относительно поверхности образца и от ИК подсветки. Определение природы ОМС в этих поверхностных слоях требует дополнительных экспериментов.

Авторы благодарят Р.В.Парфеньева за интерес к работе.

## Список литературы

- [1] В.В. Косарев, Р.В. Парфеньев, В.В. Попов, С.С. Шалыт. ФТТ, **18**, 489 (1976).
- [2] В.В. Попов, М.Л. Шубников, С.С. Шалыт, В.В. Косарев. ФТП, **11**, 1914 (1977).
- [3] В.В. Косарев, Д.В. Машовец, Р.В. Парфеньев, С.С. Шалыт. ФТТ, **20**, 1052 (1978).
- [4] В.И. Петровский, Н.Н. Соловьев, Э.М. Омельяновский, В.С. Ивлева. ФТП, **12**, 1904 (1978).
- [5] Э.М. Омельяновский, В.И. Фистуль, Л.А. Балагуров, В.С. Ивлева, В.В. Каратаев, М.Г. Мильвидский, А.И. Попков. ФТП, **9**, 576 (1975).
- [6] V.V. Popov, V.V. Kosarev. Phys. St. Sol. (a), **58**, 231 (1980).
- [7] В.Л. Гуревич. ФТТ, **4**, 909 (1962).
- [8] A.R. Hutson, D.L. White. J. Appl. Phys., **33**, 40 (1962).
- [9] Ю.М. Гальперин, И.Л. Дричко, Л.Б. Литвак-Горская. ФТТ, **26**, 701 (1986).
- [10] Ю.М. Гальперин, И.Л. Дричко, Л.Б. Литвак-Горская. ФТТ, **30**, 3118 (1988).
- [11] Ю.М. Гальперин, И.Л. Дричко, Л.Б. Литвак-Горская. ФТП, **21**, 124 (1987).
- [12] Ю.М. Гальперин, И.Л. Дричко, Д.В. Шамшур. ФТТ, **32**, 2579 (1990).
- [13] В.С. Векшина, И.Л. Дричко, Н.И. Пепик. ФТТ, **26**, 2048 (1984).

Редактор Т.А. Полянская

# Effect of the surface conductivity on acoustic and galvanomagnetic properties of high resistivity $n$ -InSb at low temperature

*I.L.Drichko, V.V.Popov*

A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, the Russian Academy of Science, 194021  
St.Petersburg, Russia

An investigation of inversion and accumulation layers on the surface of crystalline high resistivity  $n$ -InSb doped with chromium and manganese was carried out in magnetic fields up to 30 kG at low temperatures (1.5–20 K), when surface conductivity is dominant. Carrier densities in  $n$ - and  $p$ -type surface layers were determined. A negative magnetoresistivity was observed in these layers, the value of which depends on the magnetic field direction with respect to the sample surface and on infra-red illumination. It has been shown that the  $n$ -type surface conductivity, which does not affect the bulk sound propagation, degrades substantially the generation of acoustic waves because of strong dependence of surface layer conductivity on magnetic field. An experimental method for introducing sound waves into a sample was proposed.

---