

Особенности электрофизических свойств гетероструктур InSb/AlInSb/AlSb с высокой концентрацией электронов в двумерном канале

© Т.А. Комиссарова*[¶], А.Н. Семенов*, Б.Я. Мельцер*, В.А. Соловьев*, Р. Paturi⁺, Д.Л. Федоров*, П.С. Копьев*, С.В. Иванов*

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Wihuri Laboratory, Department of Physics and Astronomy, University of Turku, FIN-20014, Turku, Finland

[¶] Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, 190005 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 июля 2013 г. Принята к печати 19 августа 2013 г.)

Работа посвящена исследованию электрофизических свойств гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) InSb/AlInSb/AlSb с высокой концентрацией электронов. Обнаружена анизотропия концентрации и подвижности электронов, измеренных в слабом магнитном поле в кристаллографических направлениях [110] и $[1\bar{1}0]$. С помощью анализа осцилляций Шубникова–де Гааза показано, что проводимость по двумерному электронному каналу КЯ InSb/AlInSb не зависит от кристаллографического направления. Вместе с тем магнитополевые зависимости модуля коэффициента Холла и удельного сопротивления структур продемонстрировали сильную чувствительность к кристаллографическому направлению. Это позволило заключить, что анизотропия транспортных параметров электронов в структурах с КЯ, измеренных в слабом магнитном поле, связана с паразитной проводимостью по буферному слою $Al_{0.09}In_{0.91}Sb$, заметный вклад в которую дают два анизотропных эффекта: влияние кластеров металлического In, неоднородно распределенных по буферному слою, и проводимость по сильнодефектному приинтерфейсному слою, плотность протяженных дефектов в котором зависит от кристаллографического направления.

1. Введение

Уникальные фундаментальные свойства антимонида индия, такие как малая ширина запрещенной зоны (0.17 эВ при 300 К), малая эффективная масса электронов ($0.014m_0$ при 300 К) и их высокая подвижность ($78\,000\text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 300 К), делают InSb перспективным материалом для создания на его основе высокочастотных транзисторов с высокой подвижностью электронов и с низким потреблением энергии [1]. В настоящее время гетероструктуры InSb/AlInSb/AlSb с двумерным (2D) электронным каналом в квантовой яме (КЯ) InSb/AlInSb активно исследуются в двух лабораториях [2,3]. Лучшие экспериментальные значения подвижности электронов в таких структурах составляют $\mu = 69\,300\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $n = 4.5 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$ (300 К) и $\mu = 395\,000\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $n = 3.21 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$ (2 К) [3]. Однако для практического применения гетероструктур с КЯ InSb/AlInSb необходимо увеличить концентрацию электронов в 2D канале, при сохранении достаточно высокой подвижности. Исследования транспортных свойств структур InSb/AlInSb с высокими значениями концентрации электронов ($n = (1.5-2) \cdot 10^{12}$ при 300 К) обнаружили, что в таких гетероструктурах существенным становится паразитный вклад δ -легированного Те барьерного слоя $Al_{0.2}In_{0.8}Sb$ [4,5]. Кроме того, в работах других авторов [6,7] была обнаружена анизотропия подвижности электронов в кристаллографических направлениях [110] и $[1\bar{1}0]$ в структурах InSb/ $Al_{0.09}In_{0.91}Sb$

с концентрацией электронов $n \approx 2 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$, которая была объяснена анизотропным рассеянием электронов в 2D канале на дефектах упаковки, плотность которых зависит от кристаллографического направления. Нужно отметить, что исследование влияния проводимости барьерного слоя AlInSb на электрические измерения и изучение анизотропии подвижности электронов в 2D канале проводились независимо, т.е. возможная электрическая анизотропия не принималась во внимание в работах, посвященных исследованию влияния барьерного слоя, и наоборот [4–7]. Кроме того, в работах [6,7] в разных кристаллографических направлениях измерялось удельное сопротивление структур, в то время как коэффициент Холла и концентрация электронов измерялись в геометрии Ван дер Пау, что не позволило выявить наличие или отсутствие анизотропии концентрации электронов.

Данная работа посвящена исследованию электрических свойств гетероструктур InSb/ $Al_{0.09}In_{0.91}Sb$ /AlSb с повышенной концентрацией электронов с целью изучения причин электрической анизотропии подобных структур и влияния проводимости буферного слоя AlInSb. Обнаружена сильная анизотропия транспортных параметров электронов (концентрации и подвижности) в исследуемых гетероструктурах, измеренных в слабом магнитном поле в двух кристаллографических направлениях [110] и $[1\bar{1}0]$. Измерения осцилляций Шубникова–де Гааза показали, что проводимость по 2D электронному каналу изотропна, а значения концентрации квантованных электронов существенно меньше определяемых из холловских измерений в разных кристаллографических направлениях. Обнаружены сильные зависимости

[¶] E-mail: komissarova@beam.ioffe.ru

Таблица 1. Основные геометрические параметры дизайна гетероструктур InSb/AlInSb/AlSb и значения концентрации и подвижности электронов, измеренные в геометрии Ван дер Пау при 300 К.

Образец	d_1 , мкм	d_2 , мкм	N	d_3 , нм	T , К	Ван дер Пау 0.1 Тл	
						n , см ²	μ , см ² /В · с
1	2	3	4	5	6	7	
A	0.67	1.5	2	20	300	$2.3 \cdot 10^{12}$	20500
B	0.69	2.5	2	20	300	$3.7 \cdot 10^{12}$	20500
C	0.36	3.2	1	27	300	$5.8 \cdot 10^{12}$	10700
D	0.36	3.2	2	25	300	$1.1 \cdot 10^{13}$	7200
F	0.41	3.8	2	40	300	$1.4 \cdot 10^{12}$	10600

модуля коэффициента Холла и удельного сопротивления от магнитного поля, различающиеся для кристаллографических направлений [110] и $[1\bar{1}0]$ и показано, что эти зависимости, а значит и анизотропия значений концентрации и подвижности электронов в структурах с КЯ, измеренных в слабом магнитном поле, определяются паразитной проводимостью по буферному слою Al_{0,09}In_{0,91}Sb, имеющей сложную природу.

2. Эксперимент

В работе исследовались гетероструктуры InSb/Al_{0,09}In_{0,91}Sb/AlSb, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs (100). Конструкция исследованных гетероструктур схематически изображена на рис. 1, геометрические параметры дизайна гетероструктур представлены в табл. 1 (2–5 столбцы). В разных образцах варьировалась толщина буферного слоя AlSb d_1 в диапазоне (0.36–0.69) мкм, толщина буферного/барьерного слоя Al_{0,09}In_{0,91}Sb d_2 в диапазоне (1.5–3.8) мкм, включающего в себя сверхрешетку Al_{0,09}In_{0,91}Sb/InSb для предотвращения распространения прорастающих дислокаций и легированный Te слой Al_{0,09}In_{0,91}Sb. Толщина квантовой ямы InSb составляла в разных структурах величину $d_3 = (20–40)$ нм. Различные гетероструктуры InSb/AlInSb/AlSb содержали одну или две КЯ. Ранее было показано, что плотность дефектов упаковки в гетероструктурах InSb/AlInSb/AlSb во многом определяется температурой роста буферного слоя AlSb [8]. В данной работе буферный слой AlSb выращивался при высокой температуре 530–550 °С, что позволило уменьшить плотность дефектов упаковки в структурах с КЯ InSb/AlInSb до $2 \cdot 10^7$ см⁻². Отличительной особенностью исследованных в данной работе структур было объемное модулированное легирование барьерного слоя Al_{0,09}In_{0,91}Sb донорной примесью Te, тогда как в большинстве известных работ барьер AlInSb легируется с помощью δ -слоя Si [2] или Te [3]. В результате была получена серия структур с КЯ InSb/AlInSb, в которых концентрация электронов варьировалась в широком диапазоне, что необходимо для исследования возможного влияния проводимости буферного слоя и анизотропии транспортных параметров на свойства

подобных гетероструктур. Значения холловской концентрации и подвижности, измеренные в геометрии Ван дер Пау в магнитном поле 0.1 Тл, представлены в табл. 1 (столбец 7). Обращают на себя внимание значения холловской подвижности в исследуемых гетероструктурах, которые заметно меньше, чем опубликованные данные [3–7], что связано с существенно более высокими значениями холловской концентрации электронов ($2 \cdot 10^{12}–1 \cdot 10^{13}$ см⁻² при 300 К). Для изучения электрической анизотропии гетероструктур InSb/AlSb/AlInSb проводились измерения коэффициента Холла и удельного сопротивления в стандартной холловской геометрии с ориентацией „холловских мостиков“ в двух кристаллографических направлениях [110] и $[1\bar{1}0]$. Измерения проводились как в слабом магнитном поле ($B = 0.1$ Тл), так и в сильных магнитных полях (до 30 Тл) в диапазоне температур от 1.6 до 300 К.

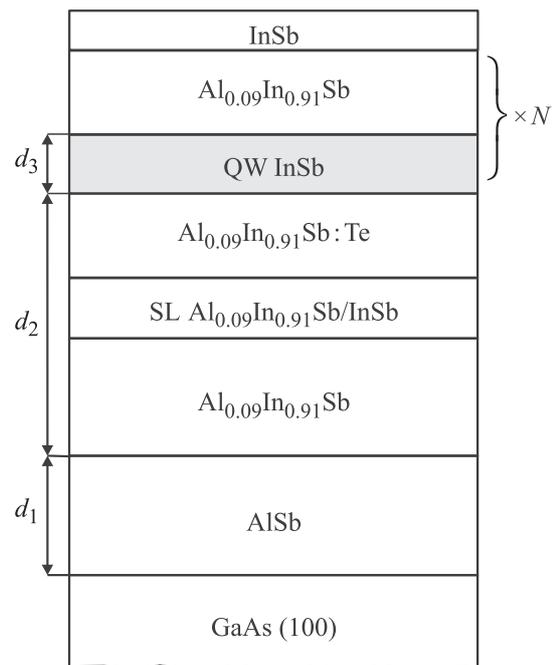


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции исследованных гетероструктур InSb/AlInSb/AlSb.

Таблица 2. Значения концентрации и подвижности электронов, измеренные в стандартной холловской геометрии с ориентацией „холловских мостиков“ в кристаллографических направлениях [110] и [110̄].

Образец	T, К	[110̄]		[110]		[110̄], [110] <i>n</i> _{SdH} , см ⁻²
		<i>n</i> , см ⁻²	<i>μ</i> , см ² /В · с	<i>n</i> , см ⁻²	<i>μ</i> , см ² /В · с	
1	2	3		4		5
A	300	3 · 10 ¹²	19600	7.5 · 10 ¹²	8100	2.5 · 10 ¹¹
	4.2	1.9 · 10 ¹²	7000	9.4 · 10 ¹²	40	
B	300	4.5 · 10 ¹²	17000	6.6 · 10 ¹²	10000	2.0 · 10 ¹²
	4.2	1.4 · 10 ¹²	11000	2.5 · 10 ¹²	2000	
C	300	1.4 · 10 ¹³	4800	2.1 · 10 ¹³	4400	1.4 · 10 ¹²
	4.2	7.7 · 10 ¹²	5100	1.1 · 10 ¹³	1200	
D	300	1.6 · 10 ¹³	6800	2.5 · 10 ¹³	2500	1.4 · 10 ¹²
	4.2	1.2 · 10 ¹³	10500	1.9 · 10 ¹³	2700	
F	300	2.9 · 10 ¹²	34000	3.4 · 10 ¹²	25800	
	4.2					

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Обнаружена сильная анизотропия значений концентрации *n* и подвижности *μ* электронов, измеренных в направлениях [110] и [110̄] в слабом магнитном поле 0.1 Тл (табл. 2, столбцы 3 и 4). Для выяснения причин электрической анизотропии были предприняты измерения магнитопольных зависимостей модуля коэффициента Холла *|R_H|* и удельного сопротивления *ρ* в сильных магнитных полях (до 30 Тл).

Типичные зависимости *|R_H|* и *ρ* от *B* представлены на рис. 2 для двух исследованных структур (A и D). *|R_H|* и *ρ* демонстрируют различное поведение при увеличении магнитного поля в зависимости от кристаллографического направления и дизайна гетероструктур InSb/AlInSb/AlSb. В большинстве исследованных структур наряду с сильными полевыми зависимостями *|R_H|* и *ρ* при низких температурах (*T* < 50 К) были обнаружены осцилляции Шубникова–де Гааза (ШдГ), которые исчезали в конфигурации, когда направление магнитного поля было перпендикулярно оси роста [001] структур, т.е. лежало в плоскости КЯ (рис. 3, а), что свидетельствует о связи этих осцилляций с проводимостью по 2D электронному каналу. Показано, что период осцилляций ШдГ (рис. 3, б), а значит, и концентрация квантованных электронов 2D канала *n_{SdH}* (табл. 2, столбец 5) не зависят от кристаллографического направления, т.е. проводимость по 2D электронному каналу гетероструктур InSb/AlInSb/AlSb изотропна. Сильное различие концентрации квантованных 2D электронов *n_{SdH}* и холловских концентраций, измеренных в направлениях [110] и [110̄] при *B* = 0.1 Тл (табл. 2, столбцы 3–5), свидетельствует о том, что помимо проводимости по 2D электронному каналу в гетероструктурах InSb/AlInSb/AlSb с высокой концентрацией электронов существует дополнительный анизотропный

механизм проводимости, который определяет сильные магнитопольные зависимости *|R_H|* и *ρ*, зависящие от кристаллографического направления, и, как результат, анизотропию транспортных параметров электронов, измеренных в слабом магнитном поле.

Проведенные ранее исследования электрических и структурных свойств эпитаксиальных слоев InSb и Al_{0.09}In_{0.91}Sb обнаружили аналогичную анизотропию транспортных параметров электронов, измеренных в слабых магнитных полях [9]. С помощью анализа осцилляций ШдГ было показано, что проводимость по объемному слою пленок InSb и Al_{0.09}In_{0.91}Sb не зависит от кристаллографического направления. Продемонстрировано, что разница значений концентрации и подвижности электронов, измеренных в слабом магнитном поле в кристаллографических направлениях [110] и [110̄], определяется двумя анизотропными эффектами: влиянием спонтанно сформированных кластеров металлического In, которые неоднородно распределены по пленке, и проводимостью сильнодефектного приинтерфейсного слоя (Al)InSb/AlSb, плотность протяженных дефектов в котором зависит от кристаллографического направления. Эти два эффекта являются также причинами и сильных магнитопольных зависимостей модуля коэффициента Холла и удельного сопротивления. Наличие кластеров металлического In приводит к аномальной возрастающей зависимости *|R_H|* от *B* и практически линейной зависимости *ρ(B)*, не выходящей на насыщение. Наличие второго канала проводимости по приинтерфейсному слою является причиной уменьшения модуля коэффициента Холла при увеличении магнитного поля. В зависимости от того, какой эффект преобладает, магнитопольная зависимость *|R_H|* может быть возрастающей, убывающей или немонотонной, обусловленной двумя эффектами.

Таким образом, сильные магнитопольные зависимости модуля коэффициента Холла и удельного сопротивления, наблюдаемые в гетероструктурах InSb/AlInSb/AlSb,

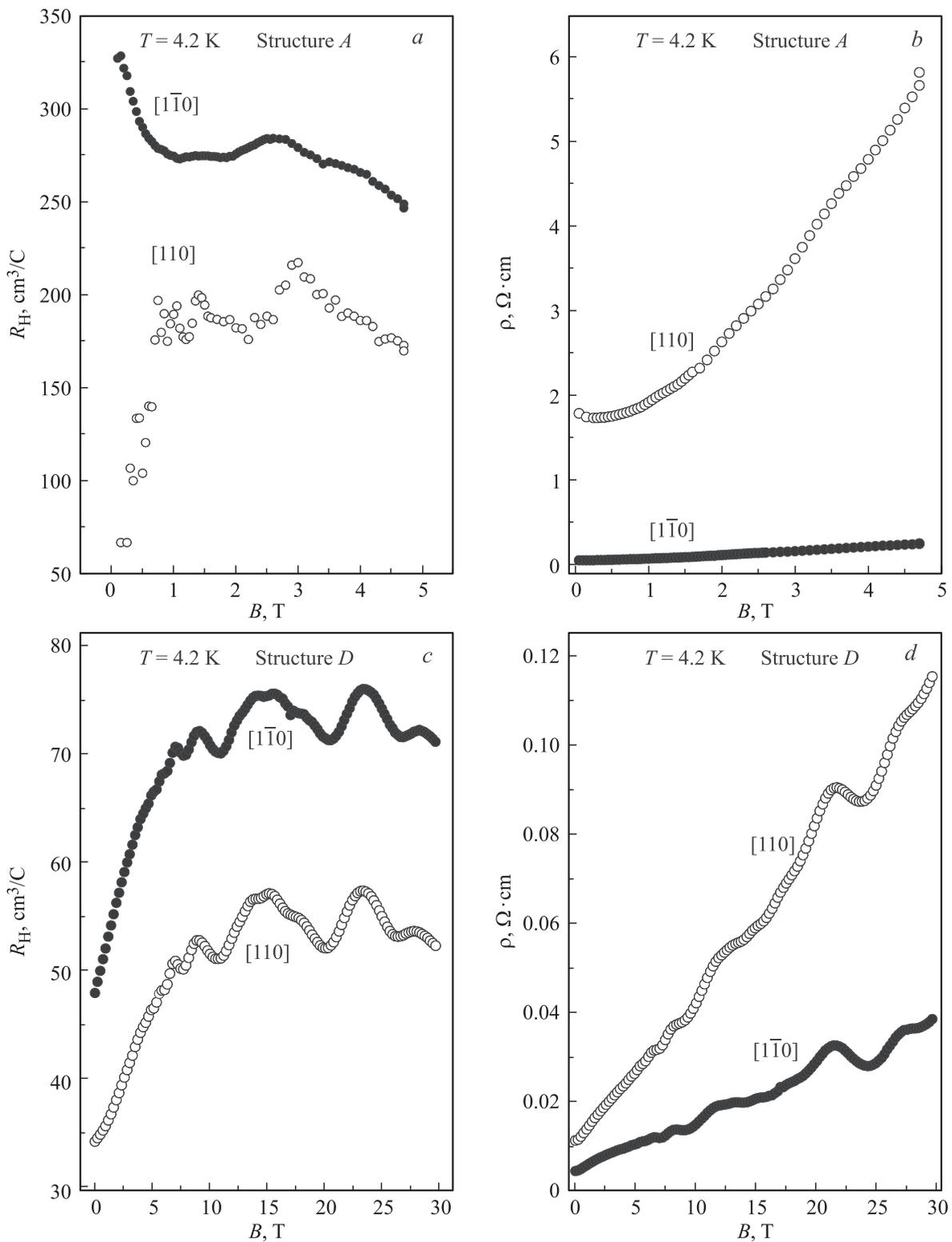


Рис. 2. Магнитополевые зависимости модуля коэффициента Холла $|R_H|$ (a, c) и удельного сопротивления ρ (b, d), измеренные для структур А (a, b) и D (c, d) при 4.2 К в кристаллографических направлениях $[1\bar{1}0]$ и $[110]$.

которые зависят от кристаллографического направления, а значит, и анизотропия транспортных параметров электронов, измеренных в слабом магнитном поле, связаны, по-видимому, с паразитной проводимостью по

буферному слою $Al_{0.09}In_{0.91}Sb$. Для проверки данного утверждения была выращена структура F (табл. 1), основным отличием которой от остальных гетероструктур было использование значительно более толстого буфер-

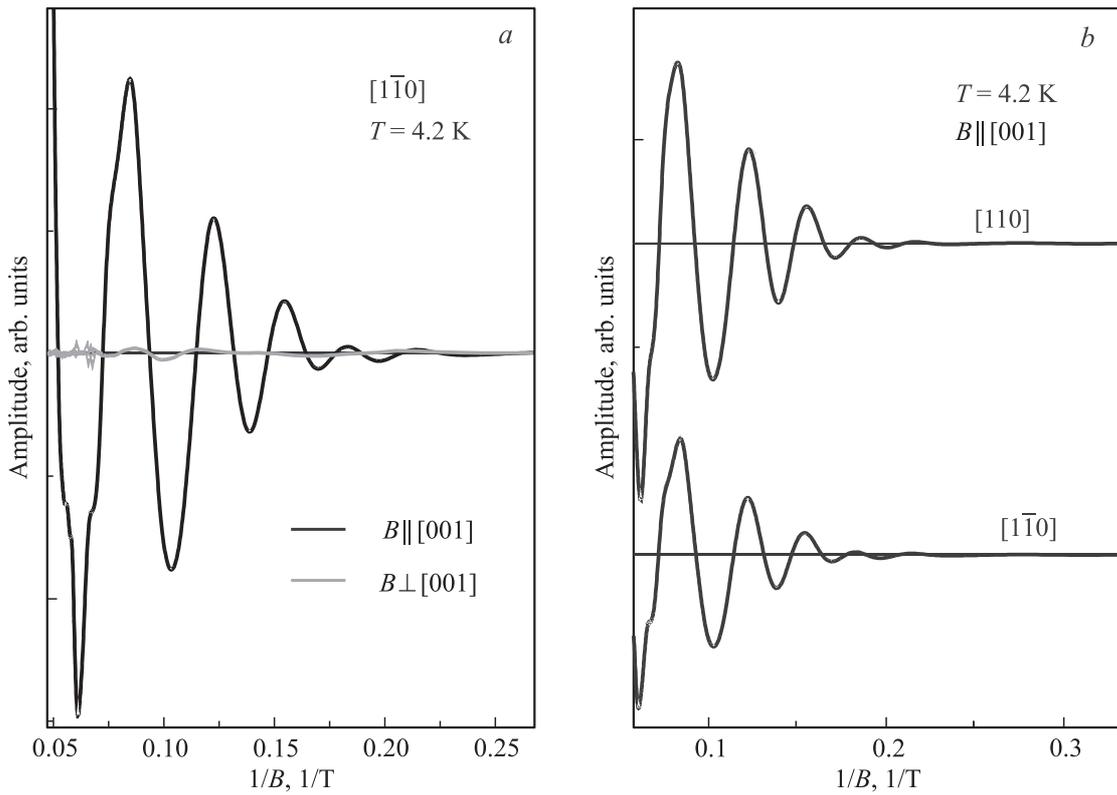


Рис. 3. Осцилляции Шубникова–де Гааза при 4.2 К, выделенные из магнитопольевой зависимости удельного сопротивления путем вычитания монотонно возрастающего фона. *a* — осцилляции ШдГ, измеренные в направлении $[1\bar{1}0]$, в конфигурациях, когда направление магнитного поля параллельно и перпендикулярно направлению роста структуры $[001]$. *b* — осцилляции ШдГ, измеренные в кристаллографических направлениях $[1\bar{1}0]$ и $[110]$, в конфигурации, когда направление магнитного поля было параллельно направлению роста структуры $[001]$.

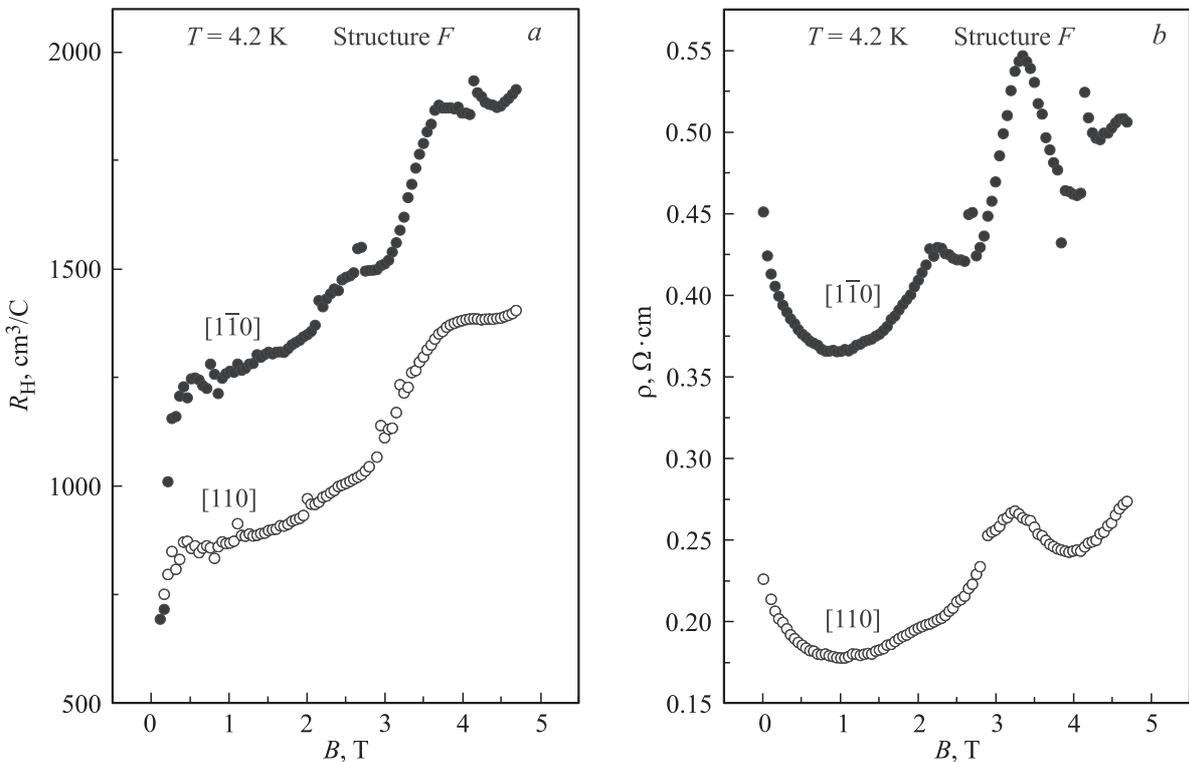


Рис. 4. Магнитопольевые зависимости модуля коэффициента Холла (*a*) и удельного сопротивления (*b*), измеренные в структуре F при 4.2 К в кристаллографических направлениях $[110]$ и $[1\bar{1}0]$.

ного слоя $\text{Al}_{0.09}\text{In}_{0.91}\text{Sb}$ и более широкой квантовой ямы $\text{InSb}/\text{AlInSb}$. Использование более толстого буферного слоя $\text{Al}_{0.09}\text{In}_{0.91}\text{Sb}$ должно, с одной стороны, уменьшить влияние проводимости по приинтерфейсному слою. Кроме того, увеличение толщины слоя AlInSb приводит к уменьшению плотности протяженных дефектов [8], а значит, и к уменьшению концентрации кластеров металлического In , которые спонтанно формируются в процессе роста преимущественно вблизи протяженных дефектов [9]. Как было показано ранее, увеличение ширины КЯ $\text{InSb}/\text{AlInSb}$ приводит к увеличению подвижности электронов 2D канала [10], что связано с уменьшением рассеяния электронов на шероховатостях интерфейса $\text{InSb}/\text{AlInSb}$. Таким образом, дизайн структуры F должен был обеспечить уменьшение паразитного влияния буферного слоя $\text{Al}_{0.09}\text{In}_{0.91}\text{Sb}$ на проводимость 2D электронного канала. На рис. 4 представлены зависимости $|R_H|$ и ρ от B для гетероструктуры F . Обнаружено, что данная структура демонстрирует квантовый эффект Холла, что говорит о хорошем структурном и электрическом качестве 2D электронного канала. Значения концентрации и подвижности электронов, измеренные в слабом магнитном поле в кристаллографических направлениях $[110]$ и $[1\bar{1}0]$, существенно лучше, чем в предыдущих структурах, даже несмотря на высокую концентрацию электронов. Кроме того, значения n и μ при 300 К слабо отличаются для разных кристаллографических направлений, что свидетельствует о более слабом влиянии проводимости по буферному слою AlInSb . Однако наблюдаемый монотонно возрастающий фон, зависящий от кристаллографического направления, в кривых $\rho(B)$, измеренных при 4.2 К (рис. 4, *b*), указывает на то, что паразитная проводимость по $\text{Al}_{0.09}\text{In}_{0.91}\text{Sb}$ и в структуре F подавлена не полностью, и необходима дальнейшая модификация дизайна гетероструктур для получения 2D электронного канала с высокой подвижностью электронов при их высокой концентрации. Следует отметить, что аналогичный монотонно возрастающий фон в зависимости $\rho(B)$ наряду с особенностями, связанными с квантовым эффектом Холла, наблюдался и в работе, посвященной исследованию влияния барьерного слоя AlInSb на электрические свойства гетероструктур с КЯ $\text{InSb}/\text{AlInSb}$ [4].

Таким образом, в работе показано, что обнаруженная анизотропия концентрации и подвижности электронов в гетероструктурах $\text{InSb}/\text{AlInSb}/\text{AlSb}$ связана с паразитной проводимостью по буферному слою $\text{Al}_{0.09}\text{In}_{0.91}\text{Sb}$, которая зависит от кристаллографического направления. Продемонстрировано, что проводимость по двумерному электронному каналу КЯ $\text{InSb}/\text{AlInSb}$ изотропна.

Частичная финансовая поддержка работы осуществлялась средствами гранта РФФИ № 11-02-12249-офи-м и Фонда Дженни и Анти Вихури (Финляндия).

Список литературы

- [1] B.R. Bennett, R. Magno, J. Brad Boos, W. Kruppa, M.G. Ancona. *Sol. St. Electron.*, **49**, 1875 (2005).

- [2] K.J. Goldammer, S.J. Chung, W.K. Liu, M.B. Santos, J.L. Hicks, S. Raymond, S.Q. Murphy. *J. Cryst. Growth*, **201/202**, 753 (1999).
- [3] A.M. Gilbertson, W.R. Branford, M. Fearn, L. Buckle, T. Ashley, L.F. Cohen. *Phys. Rev. B*, **79**, 235 333 (2009)
- [4] O.J. Pooley, A.M. Gilbertson, P.D. Buckle, R.S. Hall, L. Buckle, M.T. Emeny, M. Fearn, L.F. Cohen, T. Ashley. *New J. Phys.*, **12**, 053 022 (2010).
- [5] A.M. Gilbertson, P.D. Buckle, M.T. Emeny, T. Ashley, L.F. Cohen. *Phys. Rev. B*, **84**, 075 474 (2011).
- [6] M.A. Ball, J.C. Keay, S.J. Chung, M.B. Santos, M.B. Johnson. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2138 (2002).
- [7] T.D. Mishima, J.C. Keay, N. Goel, M.A. Ball, S.J. Chung, M.B. Johnson, M.B. Santos. *J. Cryst. Growth*, **251**, 551 (2003).
- [8] А.Н. Семенов, Б.Я. Мельцер, В.А. Соловьев, Т.А. Комиссарова, А.А. Ситникова, Д.А. Кириленко, А.М. Надточий, Т.В. Попова, П.С. Копьев, С.В. Иванов. *ФТП*, **45**, 1379 (2011).
- [9] Т.А. Комиссарова, А.Н. Семенов, Д.А. Кириленко, В.Я. Мельцер, В.А. Соловьев, А.А. Ситникова, П. Патурси, С.В. Иванов. arXiv:1307.2368 [cond-mat.mtrl-sci].
- [10] J.M.S. Orr, A.M. Gilbertson, M. Fearn, O.W. Croad, C.J. Storey, L. Buckle, M.T. Emeny, P.D. Buckle, T. Ashley. *Phys. Rev. B*, **77**, 165 334 (2008).

Редактор Т.А. Полянская

Peculiarities of electrophysical properties of $\text{InSb}/\text{AlInSb}/\text{AlSb}$ heterostructures with high electron concentration in two-dimensional channel

T.A. Komissarova*, A.N. Semenov*, B.Ya. Meltser*, V.A. Solov'ev*, P. Patursi⁺, D.L. Fedorov[•], P.S. Kop'ev*, S.V. Ivanov*

* Ioffe Physical Technical Institute,

Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

+ Wihuri Laboratory,

Department of Physics and Astronomy,
University of Turku,
FIN-20014, Turku, Finland

• Ustinov Baltic State Technical University,
190005 St. Petersburg, Russia

Abstract We report on electrophysical properties of $\text{InSb}/\text{AlInSb}/\text{AlSb}$ heterostructures with high electron concentration. Anisotropy of the electron concentration and mobility measured at a low magnetic field in $[110]$ and $[1\bar{1}0]$ crystallographic directions has been observed. It has been established by analysis of the Shubnikov-de Haas oscillations that the conductivity through the two-dimensional electron channel does not depend on the crystallographic direction. However magnetic-field dependences of the Hall coefficient and resistivity of the structures revealed strong influence of the crystallographic directions. It has allowed one to conclude that these dependences and low-field electrical anisotropy correspond to the parasitic conductivity through the $\text{Al}_{0.09}\text{In}_{0.91}\text{Sb}$ buffer layer with two pronounced anisotropic contributions: influence of metallic In nanoclusters inhomogeneously distributed within the buffer layer and conductivity of the near-interface layer with high anisotropic density of extended defects.