

07.2

InSb/GaAs-гетероструктуры для датчиков магнитного поля© М.А. Суханов¹, Д.Ю. Протасов^{1,2}, А.К. Бакаров¹, А.А. Макеева¹, И.Д. Лошкарев¹, К.С. Журавлев¹¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: msukhanov@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2023 г.

В окончательной редакции 4 мая 2023 г.

Принято к публикации 5 сентября 2023 г.

В слоях InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs, изучены структурные дефекты и транспортные свойства. Определен состав буферного слоя, обеспечивающего в нелегированных слоях InSb толщиной $0.5 \mu\text{m}$ наименьшую плотность дефектов и подвижность электронов около $39\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при комнатной температуре. На основе легированных донорами слоев InSb сформирован датчик Холла с высокой чувствительностью $\sim 27 \text{ V}/(\text{A} \cdot \text{T})$ при комнатной температуре.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, слои InSb на GaAs, датчик Холла.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56343.19617

Датчики Холла широко используются для измерения характеристик магнитных полей во многих областях науки и техники. Важнейшими параметрами датчиков являются чувствительность (S) к магнитному полю, которая определяется как $S = U_H/B$ (где U_H — холловское напряжение, B — магнитная индукция), а также температурная стабильность чувствительности. В зависимости от режима работы чувствительность датчика определяется различными параметрами структуры. В режиме работы при постоянном токе, протекающем через структуру,

$$S_I = \frac{I}{e n d}, \quad (1)$$

где I — постоянный ток, n — концентрация электронов в активном слое структуры, d — толщина слоя, e — заряд электрона; в режиме постоянного прикладываемого напряжения $S_U \propto \mu$ (μ — подвижность носителей заряда); в режиме работы при постоянной мощности электрического поля $S_p \propto \sqrt{\mu/n d}$. Соответственно для повышения чувствительности датчика Холла в первом случае используют тонкие слои широкозонных полупроводников, однако при этом высокое сопротивление датчика затрудняет изготовление омических контактов. Во втором режиме преимущество имеют материалы с высокой подвижностью носителей заряда. В третьем случае для изготовления датчиков лучше использовать тонкие слои материалов с высокой подвижностью и малой концентрацией носителей заряда.

InSb — узкозонный полупроводник, имеющий высокую подвижность $\mu \geq 60\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и собственную концентрацию электронов $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ при температуре $T = 300 \text{ K}$ [1]. При использовании InSb в качестве активного слоя изменение температуры на один градус приводит к относительному изменению собственной концентрации на 2.2%, у более широкозонных полупроводников изменение собственной концентрации в процентном соотношении больше (например, для Si

оно составляет 8.3% на один градус). Таким образом, благодаря высокой подвижности и слабой зависимости собственной концентрации от температуры InSb широко используется для изготовления датчиков магнитного поля. Ввиду отсутствия непроводящих подложек InSb для создания датчиков Холла слои InSb выращиваются на полуизолирующих подложках GaAs или высокоомных подложках Si. Рассогласование между постоянными решетки InSb и GaAs ($\sim 14\%$), InSb и Si ($\sim 19\%$) приводит к возникновению на гетерогранице дислокаций, дефектов упаковки и двойников, которые уменьшают подвижность носителей заряда и снижают характеристики приборов. Подвижность электронов в слоях InSb, выращенных на GaAs без дополнительных буферных слоев, растет по мере увеличения толщины слоя из-за уменьшения плотности структурных дефектов и составляет $\sim 60\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при толщине $2 \mu\text{m}$ и температуре 300 K [1]. Введение буферных слоев между подложкой GaAs и слоем InSb понижает плотность дефектов и повышает подвижность электронов [2], что позволяет уменьшать толщину слоя InSb без уменьшения подвижности электронов и соответственно увеличивать чувствительность датчиков Холла. Для увеличения температурной стабильности чувствительности слои InSb легируют донорами.

Согласно литературным данным, слои InSb для датчиков Холла выращиваются методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и методом мгновенного испарения (flash evaporation), который используется наиболее часто [3–7]. Эпитаксиальные слои InSb, выращенные методом МЛЭ, имеют меньшую плотность структурных дефектов [4], чем слои, выращенные методом мгновенного испарения, что позволяет получить большую подвижность электронов и более высокую чувствительность к магнитному полю.

Цель настоящей работы состоит в поиске лучшей конструкции буферного слоя и условий роста гетеро-

| I | | II | | III | | IV | |
|--|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|
| InSb | 0.5 μm | InSb | 0.5 μm | InSb | 0.5 μm | InSb | 0.5 μm |
| In _{0.75} Al _{0.25} Sb | 1 μm | In _{0.85} Al _{0.15} Sb | 0.2 μm | InSb/In _{0.85} Al _{0.15} Sb SL (2.5/2.5 nm) \times 10 | | In _{0.85} Al _{0.15} Sb | 0.3 μm |
| AlSb | 20 nm | In _{0.75} Al _{0.25} Sb | 0.8 μm | In _{0.85} Al _{0.15} Sb | 0.2 μm | In _{0.75} Al _{0.25} Sb | 1.2 μm |
| | | AlSb | 20 nm | InSb/In _{0.75} Al _{0.25} Sb SL (2.5/2.5 nm) \times 10 | | AlSb | 20 nm |
| | | | | In _{0.75} Al _{0.25} Sb | 0.8 μm | | |
| | | | | AlSb | 20 nm | | |

Рис. 1. Состав буферных слоев.

структур InSb на GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии для высокочувствительных температурно-стабильных датчиков Холла.

Гетероструктуры на основе InSb были выращены на установке МЛЭ Riber Compact 21 T, оснащенной вентильным источником сурьмы, источниками алюминия, индия и кремния. Процесс роста контролировался методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Скорости роста и состав слоев определялись по осцилляциям зеркального пучка картины ДБЭ. В соответствии с данными, полученными в работе [8], для всех образцов поверхность подложки GaAs выдерживалась в потоке Sb на этапе удаления оксида, после этого выращивался слой AlSb толщиной 20 nm. При росте первых монослоев AlSb, согласно картине ДБЭ, наблюдался трехмерный режим роста, в конце роста слоя AlSb происходил переход к двумерному режиму роста. Затем выращивались буфер и слой InSb толщиной 0.5 μm . Слои InSb и InAlSb во всех структурах выращивались в условиях обогащения поверхности сурьмой, что контролировалось по наличию реконструкции поверхности (1×3).

На рис. 1 схематически показаны гетероструктуры с различными конструкциями буфера (образцы I–IV). Наиболее подходящим материалом в качестве буферного слоя является In_{1-x}Al_xSb из-за меньшего решеточного рассогласования с InSb ($\sim 0.7\%$ при $x = 0.15$) и более широкой запрещенной зоны ($E_g \approx 0.43$ eV при $T = 300$ K) [9]. При уменьшении доли алюминия рассогласование с InSb уменьшается, возрастает собственная проводимость, что накладывает ограничение на минимальную долю алюминия. Использование напряженных сверхрешеток (SL) в буферных слоях позволяет уменьшить плотность прорастающих дислокаций [2,10], поэтому в одном из образцов была использована короткопериодная напряженная сверхрешетка InSb/InAlSb. Для определения наилучшего буферного слоя методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) была исследована

морфология поверхности выращенных гетероструктур. Структурное совершенство слоев оценивалось методом рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения с использованием рентгеновского излучения $\text{CuK}_{\alpha 1}$ и монохроматора Ge (004). Концентрация и подвижность электронов определялись методом Ван-дер-Пау при $T = 300$ K и $B = 0.2$ T. После определения наилучшего буферного слоя на его основе была выращена гетероструктура с легированным кремнием слоем InSb толщиной 0.5 μm с концентрацией доноров $4.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ — образец V. Для калибровки источника кремния были выращены легированные слои InSb толщиной 5 μm на GaAs, концентрация измерена методом Ван-дер-Пау при $T = 77$ K. Датчик магнитного поля был сформирован на основе образца V методами фотолитографии и жидкостного травления с напылением металлических контактов Ti/Au.

На рис. 2, a показано АСМ-изображение поверхности образца I, на котором окружностями выделены области с типичными дефектами. На поверхности всех образцов наблюдалось три типа дефектов: дефекты типа A — немоноатомные ступени, дефекты типа B — холмы, дефекты типа C — усеченные пирамиды. Все отмеченные дефекты являются характерными для слоев InSb на GaAs. Дефекты типа A возникают из-за образования дефектов двойникования [11]. Дефекты типа B появляются в результате роста вокруг винтовых дислокаций, дефекты типа C являются следствием образования дефектов упаковки, пересекающих поверхность (001) в направлениях $[\bar{1}10]$ и $[110]$ [12].

На рис. 2, b показана карта распределения интенсивности дифрагировавшего рентгеновского излучения в обратном пространстве вблизи узла InSb (004) для образца IV. Трех слоям гетероструктуры соответствуют три уширенных рефлекса. За начало координат принимался рентгеновский максимум, соответствующий слою InSb. Уширение узла вдоль оси OY соответствует ориента-

Параметры носителей заряда и плотность дефектов выращенных образцов

| Образец | n, cm^{-3} | $\mu, \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ | Плотность дефектов A, cm^{-1} | Плотность дефектов B, cm^{-2} | ПШПВ (dq_z), \AA^{-1} |
|---------|----------------------|--|--|--|------------------------------------|
| I | $2.06 \cdot 10^{16}$ | 31748 | 856 | 10^7 | 0.00251 |
| II | $2.04 \cdot 10^{16}$ | 34518 | 692 | $7.5 \cdot 10^6$ | 0.00228 |
| III | $1.97 \cdot 10^{16}$ | 37967 | 636 | $7.1 \cdot 10^6$ | 0.00226 |
| IV | $2.06 \cdot 10^{16}$ | 38714 | 521 | $4.4 \cdot 10^6$ | 0.00205 |
| V | $4.5 \cdot 10^{17}$ | 16300 | | | — |

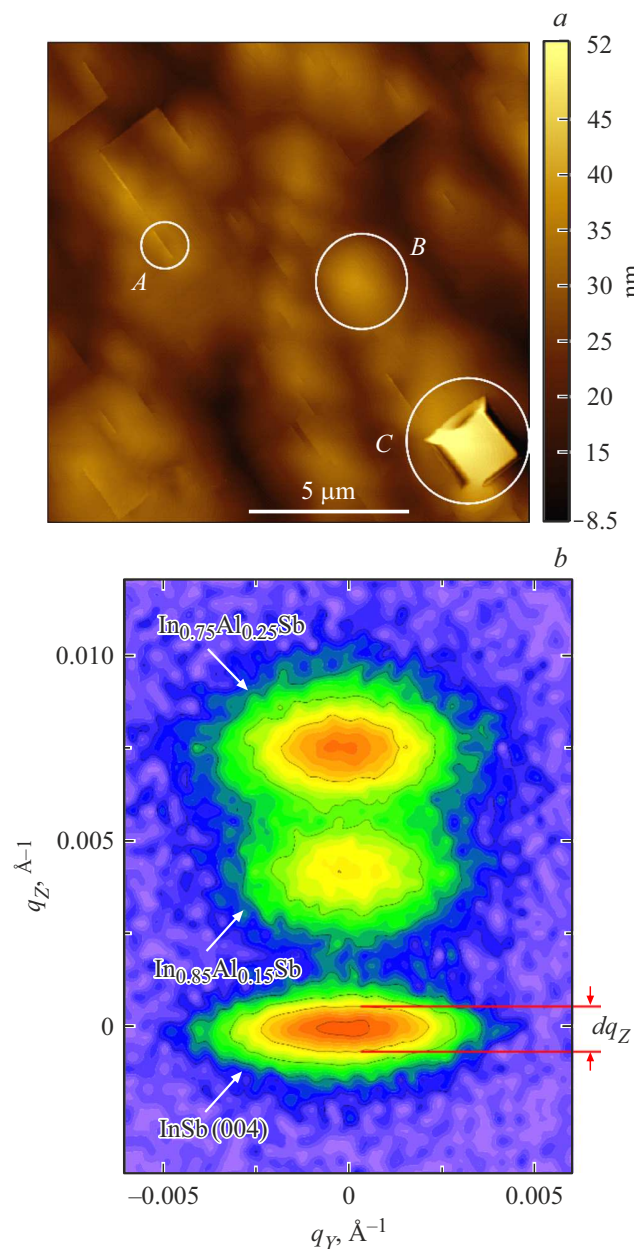


Рис. 2. *a* — АСМ-изображение поверхности образца I. Светлыми окружностями выделены типичные наблюдаемые дефекты. *b* — карта обратного пространства образца IV. Горизонтальными линиями выделена ПШПВ узла (004) активного слоя InSb.

ционным искажениям кристаллической решетки слоя, в основном из-за присутствия дислокаций несоответствия. Уширение узла вдоль оси OZ связано с искажением параметра кристаллической решетки из-за присутствия различных типов дефектов. Структурное совершенство слоев InSb оценивалось по полной ширине на половине высоты (ПШПВ) узла InSb (004) вдоль OZ (обозначено dq_z на рис. 2, *b*). Наименьшее значение dq_z наблюдается у образца IV.

В таблице представлены значения плотности дефектов типа A и B , ПШПВ узла InSb (004), а также подвижность и концентрация электронов в слоях InSb. Как видно из таблицы, по мере уменьшения плотности дефектов типа A и B уменьшается ПШПВ и увеличивается подвижность электронов. Дефекты типа C неоднородно распределены по поверхности образцов и слабее влияют на подвижность ввиду меньшей плотности. Согласно данным таблицы, уменьшение плотности структурных дефектов при использовании двух сверхрешеток (образец III) и при увеличении толщины слоев InAlSb на $0.5 \mu\text{m}$ (образец IV) почти одинаково повышает подвижность электронов. Более подробно влияние структурных дефектов на подвижность электронов будет обсуждаться в следующей работе. Отметим, что подвижность электронов в слое InSb толщиной $0.5 \mu\text{m}$ с концентрацией электронов $\sim 4.5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, использованном для изготовления датчика, выше, чем в слоях InSb толщиной $1.1 \mu\text{m}$ с концентрацией $4 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, полученных методом мгновенного испарения [4], что показывает высокое структурное совершенство слоев InSb, выращенных методом МЛЭ. Полученные данные позволили определить конструкцию буферного слоя (образец IV), обеспечивающего лучшие структурные и транспортные характеристики слоев InSb.

Измерения чувствительности датчика Холла проводились в режиме постоянного тока при $I = 1 \text{mA}$ в диапазоне температур $T = 77\text{--}330 \text{K}$. На рис. 3 приведена температурная зависимость чувствительности датчика, полученная в настоящей работе, а также температурные зависимости из работ [4,6]. Величина чувствительности нормирована на ток. Уменьшение чувствительности по мере увеличения температуры связано с увеличением собственной концентрации электронов в слое InSb. Как

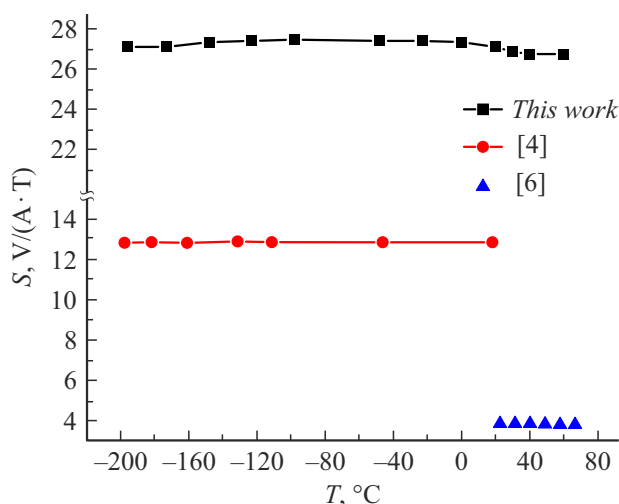


Рис. 3. Температурные зависимости чувствительности датчика Холла на основе InSb, полученного в настоящей работе и в работах [4,6].

видно из рис. 3, чувствительность датчика, полученного в настоящей работе, выше, чем в [4,6], что связано с меньшей толщиной слоя и различием в степени легирования. Отношение чувствительности датчика, представленного в настоящей работе, к чувствительности датчиков из [4–7] хорошо описывается формулой (1), при этом для датчика на основе нелегированного InSb из работы [3] формула предсказывает большую чувствительность. Уменьшение чувствительности датчика может быть связано с высокой проводимостью буферного слоя InSb. Уменьшение толщины слоя InSb обычно увеличивает его сопротивление из-за понижения подвижности электронов, обусловленного ростом плотности дефектов вблизи буфера. Увеличение сопротивления приводит к необходимости повышать напряжение, требуемое для поддержания постоянного тока, протекающего через датчик, что сужает диапазон применения датчика [7]. Подобная ситуация наблюдается и в других режимах работы датчика, когда ухудшение качества структур приходится компенсировать повышенным потреблением энергии, что неприемлемо для многих приложений.

Таким образом, в настоящей работе проведена оптимизация конструкции буферного слоя, что эффективно понизило плотность структурных дефектов, увеличило подвижность электронов и проводимость активного слоя InSb. Это позволило повысить чувствительность датчика магнитного поля без ухудшения режима его работы.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФП СО РАН (шифр темы: FWGW-2022-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Zhang, S.K. Clowes, M. Debnath, A. Bennett, C. Roberts, J.J. Harris, R.A. Stradling, L.F. Cohena, T. Lyford, P.F. Fewster, *Appl. Phys. Lett.*, **84** (22), 4463 (2004). DOI: 10.1063/1.1748850
- [2] X. Zhao, Y. Zhang, M. Guan, L. Cui, B. Wang, Z. Zhu, Y. Zeng, *J. Cryst. Growth*, **470**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2017.03.051
- [3] O. Kazakova, J.C. Gallop, P. See, D. Cox, G.K. Perkins, J.D. Moore, L.F. Cohen, *IEEE Trans. Magn.*, **45** (10), 4499 (2009). DOI: 10.1109/TMAG.2009.2025513
- [4] M. Oszwaldowski, T. Berus, *Thin Solid Films*, **515** (4), 2692 (2006). DOI: 10.1016/j.tsf.2006.07.023
- [5] T. Berus, M. Oszwaldowski, J. Grabowski, *Sensors Actuators A*, **116** (1), 75 (2004). DOI: j.sna.2004.03.029
- [6] S. El-Ahmar, M. Przychodnia, J. Jankowski, R. Prokopowicz, M. Ziemba, M.J. Szary, W. Reddig, J. Jagiełło, A. Dobrowolski, T. Ciuk, *Sensors*, **22** (14), 5258 (2022). DOI: 10.3390/s22145258
- [7] J. Jankowski, S. El-Ahmar, M. Oszwaldowski, *Sensors*, **11** (1), 876 (2011). DOI: 10.3390/s110100876
- [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** (10), 1379 (2011). [A.N. Semenov, B.Ya. Meltser, V.A. Solov'ev, T.A. Komissarova, A.A. Sitnikova, D.A. Kirylenko, A.M. Nadtochiy, T.V. Popova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov, *Semiconductors*, **45** (10), 1327 (2011). DOI: 10.1134/S1063782611100150].
- [9] G. Chen, W. Sun, Y. Lv, *Infrared Phys. Technol.*, **81**, 262 (2017). DOI: 10.1016/j.infrared.2017.01.014
- [10] A.E. Blakeslee, *MRS Online Proceedings Library*, **148**, 217 (1989). DOI: 10.1557/PROC-148-217
- [11] T.D. Mishima, J.C. Keay, N. Goel, M.A. Ball, S.J. Chung, M.B. Johnson, M.B. Santos, *Physica E*, **20** (3-4), 260 (2004). DOI: 10.1016/j.physe.2003.08.014
- [12] M.A. Ball, J.C. Keay, S.J. Chung, M.B. Santos, M.B. Johnson, *Appl. Phys. Lett.*, **80** (12), 2138 (2002). DOI: 10.1063/1.1463206