

Об.2; 12

© 1992

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАННЫХ СВЕРХРЕШЕТОК  $Si:Sb$ 

А.В. З о т о в, В.Г. Л и ф ш и ц, С.В. Р ы ж к о в

В работах [1. 2] было высказано предположение, что можно ожидать увеличение подвижности носителей заряда в структурах, где значительная часть носителей может проникать из сильно легированных областей в области с низким уровнем легирования. Предполагалось также, что наиболее предпочтительными кандидатами для обнаружения такого эффекта являются сверхрешетки из дельта-легированных слоев, в которых атомы легирующей примеси находятся в сверхтонких слоях толщиной порядка одного межатомного расстояния, разделенных слоями слабо легированного полупроводника. В пользу такого предположения говорили результаты теоретического исследования работы [3], в которой был сделан вывод, что периодическое дельта-легирование может приводить к подавлению упругого рассеяния носителей заряда.

Целью настоящей работы была экспериментальная проверка этого предположения, для чего были проверены измерения проводимости и постоянной Холла в дельта-легированных сверхрешетках  $Si:Sb$  с периодом от 1.5 до 100 нм.

Выращивание дельта-легированных сверхрешеток  $Si:Sb$  проводили в сверхвысоковакуумной камере с базовым вакуумом  $2 \times 10^{-10}$  Тор. Камера была оснащена набором сублимационных источников  $Si$  и ячейкой Кнудсена для осаждения  $Sb$ . Для анализа кристаллической структуры и химического состава поверхности образцов применяли методы дифракции медленных электронов (ДМЭ) и электронной оже-спектроскопии (ЭОС). В качестве образцов использовали прямоугольные пластины  $Si$  марки КДБ-10 с ориентацией (100). Перед помещением в камеру образцы тщательно очищались в органических растворителях. Окончательная очистка поверхности от окисла и остаточных углеродных загрязнений заключалась в прогреве образца при 1200 °C в течение 3 мин в вакууме. В результате от образца наблюдалась четкая картина ДМЭ (2x1) а оже-анализ показывал отсутствие загрязнений на поверхности.

Для формирования дельта-легированных сверхрешеток использовали следующую методику: на подложке наращивали буферный слой  $Si$   $n$ -типа ( $p=0.1 \Omega \cdot \text{см}$ ) толщиной 150 нм для обеспечения электрической изоляции от подложки посредством  $p$ - $n$ -перехода. После этого напылением  $Sb$  на поверхности при  $T=630$  °C создавали поверхностную фазу  $Si(100)-Sb$  с покрытием 1 моноатомный слой ( $1 \text{ MC}=6.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) [4]. Далее с помощью метода твердо-

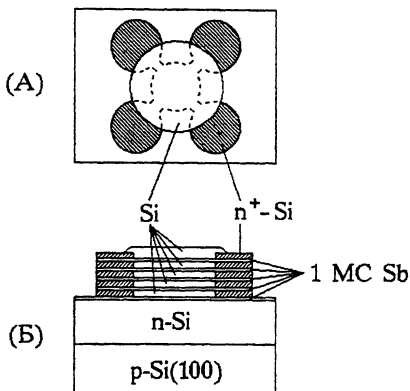


Рис. 1. Схематическое изображение образца с дельта-легированной сверхрешеткой  $Si:Sb$  и контактными площадками. а - вид сверху; б - поперечное сечение. Пунктирной линией показана форма мезоструктуры для электрических измерений.

фазной эпитаксии (ТФЭ) [5, 6] на поверхностной фазе  $Si(100)-Sb$  наращивали эпитаксиальный слой  $Si$  ( $p=0.5 \Omega \cdot \text{см}$ ,  $n$ -тип) и контактные площадки из сильно-легированного  $Si$  ( $p=0.002 \Omega \cdot \text{см}$ ,  $n$ -тип). Для формирования контактных площадок использовали напыление через маску с четырьмя отверстиями. Повторяя описанную выше процедуру, получали структуру с дельта-легированной сверхрешеткой  $Si:Sb$  и контактными площадками для проведения измерений проводимости и эффекта холла по методу Ван-дер-Пау (рис. 1) Перед измерениями на образце вытравливалась крестообразная мезоструктура. Измерения проводились при комнатной температуре.

В качестве отправной точки для исследования дельта-легированных сверхрешеток первоначально были проведены измерения электрических характеристик структур с одним дельта-легированным слоем  $Si(100):Sb$ . Измерения показали, что слоевая концентрация электронов ( $n_s$ ) в дельта-слое -  $(1.2 \pm 0.3) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , а холловская подвижность -  $(60 \pm 10) \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Обе полученные нами величины хорошо согласуются с определенными ранее в работах [7, 8].

Результаты электрофизических измерений, проведенных на образцах с дельта-легированными сверхрешетками, представлены на рис. 2.

Рис. 2, а показывает зависимость средней объемной концентрации носителей в сверхрешетке ( $\bar{N}$ ) от ее периода  $d$ . Зависимость хорошо описывается соотношением типа  $\bar{N} \sim 1/d$  с коэффициентом пропорциональности, равном  $n_s = 1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , что соответствует неизменной величине коэффициента электрической активации  $Sb$  ( $\sim 0.2$ ) в одиночном дельта-слое и в сверхрешетках. Неизменность коэффициента активации позволяет получить в сверхрешетках с ко-

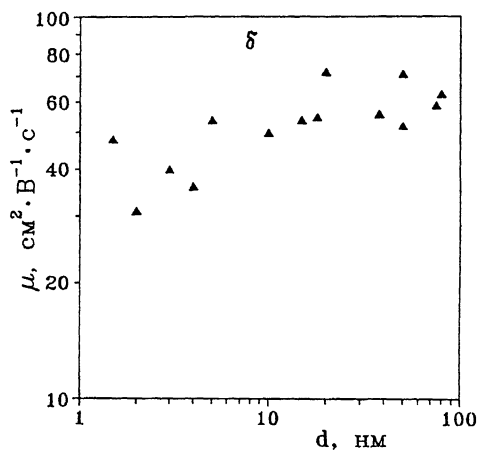
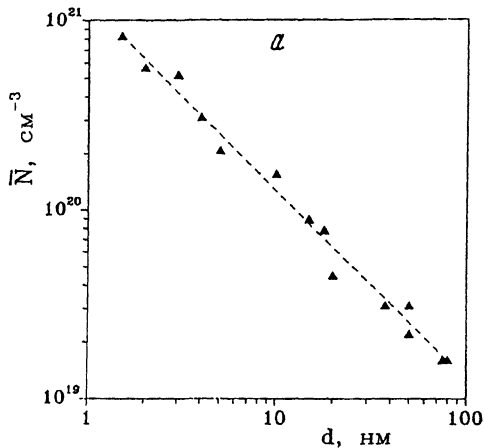
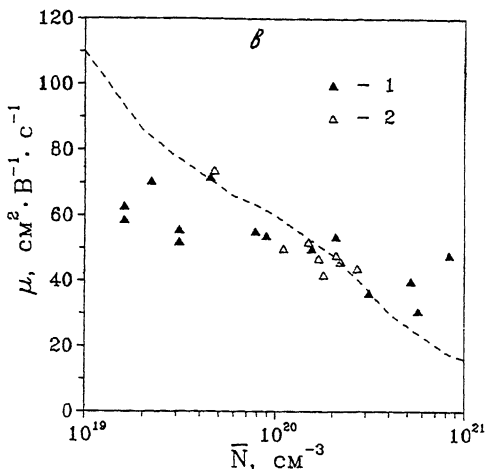


Рис. 2. Результаты электрофизических измерений: а) Зависимость средней концентрации  $\bar{N}$  электронов от периода сверхрешетки  $d$ . Пунктирной линией показана зависимость  $\bar{N} = n_s/d$ . б) Зависимость подвижности электронов  $\mu$  от периода сверхрешетки  $d$ . в) Зависимость  $\mu$  от  $\bar{N}$  для дельта-легированных сверхрешеток  $\text{Si}:\text{Sb}$  (1) и однородно легированных пленок  $\text{Si}:\text{Sb}$ , выращенных методом ТФЭ в аналогичных условиях (2). Пунктирной линией показана зависимость  $\mu(N)$  для объемных монокристаллов  $\text{Si}:\text{As}$  из работы [10].



роткими периодами очень высокие значения средней объемной концентрации носителей. Максимальная величина (полученная в решетке с периодом 1.5 нм) составляет  $8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Это значительно выше, чем предел равновесной растворимости  $\text{Sb}$  в  $\text{Si}$  ( $\sim 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при  $700^\circ \text{C}$ ) [9] и превосходит максимальную концентрацию носителей, зафиксированную в однородно легированных слоях  $\text{Si}:\text{Sb}$ , выращенных методом ТФЭ в аналогичных условиях ( $\sim 2 \div 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) [5, 6].

На рис. 2, б показана зависимость подвижности носителей от периода сверхрешетки. Видно, что подвижность слабо меняется с уменьшением периода решетки в диапазоне  $d \sim 10-100$  нм), и ее величина совпадает с величиной подвижности в одиночном дельта-легированном слое ( $\sim 60 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ). В области малых периодов решетки ( $d \leq 10$  нм) наблюдается уменьшение подвижности до величины  $\sim 40 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для сопоставления полученных результатов с результатами для подвижности в однородно легированном кремнии данные рис. 2, а и 2, б сведены в график  $\mu(\bar{N})$  на рис. 2в. На рисунке приведена также зависимость  $\mu(\bar{N})$  для объемных монокристаллов  $\text{Si}:\text{As}$  из работы [10]. На рис. 2, в видно, что в то время как подвижность в однородно легированных пленках  $\text{Si}:\text{Sb}$ , выращенных методом ТФЭ, хорошо согласуется с зависимостью из работы [10], подвижность в дельта-легированных сверхрешетках  $\text{Si}:\text{Sb}$  заметно отличается: в области малых значений  $\bar{N}$ , т. е. при больших периодах решетки ( $d \geq 10$  нм) подвижность меньше, а в случае больших  $\bar{N}$  и малых периодах решетки ( $d \leq 5$  нм) несколько больше, чем подвижность для объемных монокристаллов.

Таким образом, в дельта-легированных решетках  $\text{Si}:\text{Sb}$  с периодом меньше  $\sim 5$  нм наблюдается увеличение подвижности носите-

лей в  $\sim 2$  раза по сравнению с величинами для объемных монокристаллов. При этом в сверхрешетках достигаются значения средней концентрации носителей, значительно превосходящие предел равновесной растворимости и максимальную концентрацию, полученную в однородно легированных слоях  $Sr:Sb$ , выращенных методом ТФЭ в аналогичных условиях.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Nakagawa K., Shiraki Y. // Solid State Commun. 1986. V. 58. P. 819-822.
- [2] Biswas R., Hopkinson M., Houghton R., Smith D.W., Parker E.H.C., Whall T.E. // Proc. 2nd Internat. Symp. on Si MBE, Hawaii, 1987. P. 545-548.
- [3] Levi A.F.J., McCall S.L., Platzman P.M. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 940-942.
- [4] Зотов А.В., Саранин А.А., Лифшиц В.Г., Храмова Е.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 24. С. 1-5.
- [5] Zotov A.V., Korobtsov V.V. // Crystal Growth. 1989. V. 98. P. 519-530.
- [6] Зотов А.В., Коробцов В.В. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 12. С. 5-16.
- [7] VanGorkum A.A., Nakagawa K., Shiraki Y. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P. 2485-2492.
- [8] Zeindl H.P., Wegehaupt T., Eisele I. // Thin Solid Films. 1990. V. 184. P. 21-29.
- [9] Смит А.М. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия. М.: Мир. 1969. С. 189.
- [10] Masetti G., Severi M., Solmi S. // IEEE Trans. Electron. Devices. 1983. V. 30. P. 764-769.

Поступило в Редакцию  
27 января 1992 г.