

06.2

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННЫХ СВЕРХРЕШЕТОК
 $Ge - Ge_{1-x}Si_x$ С СЕЛЕКТИВНО
ЛЕГИРОВАННЫМИ СЛОЯМИЛ.К. Орлов, О.А. Кузнецов,
Р.А. Рубцова

В последние годы повышенный интерес вызывают напряженные сверхрешетки (СР) на основе Si , Ge и их твердых растворов, использование которых в микроэлектронике расширяет возможности традиционной кремниевой технологии. Указанные структуры обладают промежуточными между Si и Ge оптическими свойствами, но в отличие от однородных твердых растворов имеют улучшенные, а зачастую и своеобразные электрические характеристики. Особый интерес при этом представляют периодические структуры с селективно легированными слоями, которым свойственны высокие значения подвижностей свободных носителей заряда при повышенной плотности их в каналах СР [1].

В настоящем сообщении впервые приводятся результаты исследования селективно-легированных гетероэпитаксиальных СР $Ge - Ge_{1-x}Si_x$ дырочного типа проводимости. СР выращивались газовым гидридным методом на Ge подложках, либо буферных слоях $Ge_{1-y}Si_y$. Слои $Ge_{1-x}Si_x$ в них легировались бором. Селективное вхождение примеси в слой твердого раствора СР подтверждено непосредственно методом ионной масс-спектрометрии и косвенно по эффекту увеличения подвижности дырок.

Важнейшими параметрами электронно-дырочной подсистемы СР являются величины энергий, соответствующие положениям краев энергетических зон в соседних слоях структуры. Расчет зонных диаграмм в сильно напряженных СР $Ge - Ge_{1-x}Si_x$ в отсутствие эффекта размерного квантования проведем, используя известные формулы, описывающие связь между сдвигом и расщеплением подзон и упругими деформациями системы. Сводка указанных формул в общем виде содержится, например, в [2]. Зонные энергетические диаграммы для двух случаев (СР $Ge - Ge_{1-x}Si_x$ выращена на Ge -подложке и буферном слое $Ge_{1-x}Si_x$) в отсутствие пластической деформации в структуре приведены в [3], где, в частности, показано, что буфер может играть важную роль, позволяя управлять амплитудой потенциала в структуре.

В СР, выращенных непосредственно на Ge -подложках и имеющих общую толщину меньше критической (пластическая деформация в структуре отсутствует), слои Ge в отличие от слоев $Ge_{1-x}Si_x$ практически не напряжены. В СР, толщина которых больше критической (на границе СР/ Ge -подложка появляется сетка дислокаций несоответствия), слои Ge , наряду со слоями твердого раствора,

подвержены деформации, что приводит к изменению симметрии кристаллической решетки и, как следствие, к сдвигу и расщеплению краев энергетических подзон. Эффект в слоях Ge усиливается при введении буферного подслоя, ослабляющего влияние подложки на СР.

В качестве примера на рис. 1 (а, б) приведены зонные энергетические диаграммы, рассчитанные для СР $Ge - Ge_{1-x}Si_x$, имеющих среднее содержание $Si \bar{x}$ (ат.%) = 8.5 (а); 10 (б) при максимальном содержании Si в слоях $Ge_{1-x}Si_x$ x (ат%) ≈ 14 (а); 17 (б); периоды d (нм) ≈ 19 (а); 24 (б); число периодов $N=90$ и упругое воздействие подложки на СР ξ (%) = 28 (а); 19 (б). Параметры x , \bar{x} , ξ и d устанавливались с помощью рентгено-дифракционного анализа. В случае „а“ СР выращивалась непосредственно на Ge -подложке, в случае „б“ - на буферном подслое $Ge_{1-\bar{x}}Si_{\bar{x}}$ толщиной ~ 1.7 мкм. Согласно проведенным оценкам, характерные значения энергий (в эВ) для слоев Ge и $Ge_{1-x}Si_x$ соответственно равны: ширина запрещенной зоны $E_{g1} = 0.49$ (а), 0.485 (б); $E_{g2} = 0.86$ (а), 0.79 (б); энергия расщепления дырочных подзон i и h $\delta E_{V1}^{ih} = -0.034$ (а), -0.044 (б); $\delta E_{V2}^{ih} = 0.049$ (а), 0.059 (б); энергия спин-орбитального расщепления $\delta E_{V1}^{2s} = 0.267$ (а), 0.265 (б); $\delta E_{V2}^{2s} = 0.27$ (а), 0.276 (б); энергия междолинного расщепления $\delta E_{C1}^{2-6} = 0.087$ (а), 0.116 (б); $\delta E_{C2}^{2-6} = -0.109$ (а), -0.128 (б).

Упругая деформация слоев системы (компоненты тензора деформаций в рассматриваемых случаях равны $\epsilon_{11,1} = -0.00245$ (а), -0.003 (б); $\epsilon_{11,2} = 0.00306$ (а), 0.0043 (б); $\epsilon_{1,1} = 0.0036$ (а), 0.0044 (б); $\epsilon_{1,1} = -0.0045$ (а), -0.0063 (б)) существенным образом меняет характер оптических спектров, обуславливая, в частности, сдвиг и расщепление спектральных линий. Спектры электроотражения света, снятые от поверхности указанных выше структур по известной электролитической методике при комнатной температуре в ближней ИК-области, представлены на рис. 1. Здесь же для сравнения (рис. 1, в) приведена спектральная кривая, полученная от гомогенной $p-i-p$ -СР с параметрами: $d_p = 8$ нм, $d_i = 16$ нм, $N = 50$, $\bar{p} \sim 4 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. Стрелками на рисунках указаны характерные энергии электронных переходов в слоях СР с учетом рассчитанных выше расщеплений подзон, что позволяет сопоставить с ними резонансные пики, наблюдаемые на спектральных зависимостях. Сравнение кривых на рис. 1 (а-в) показывает, что в СР имеет место значительный сдвиг оптической ширины запрещенной зоны структуры в коротковолновую область спектра. Число пиков в спектре электроотражения света от поверхности гетероструктуры „а“, „б“, кроме того, значительно возрастает по сравнению с гомосистемой „в“, что связано с наложением спектров от двух типов напряженных слоев (Ge и $Ge_{1-x}Si_x$) и расщеплением дырочных подзон. Смещение и расщепление пиков в структуре „а“ по сравнению со структурой „в“ указывает на деформацию слоев Ge относительно подложки, что имеет место при появлении на границе СР/подложка сетки дислокаций, сдвигающей частично упругое воздействие подложки на СР. Возникающая сетка дислокаций, расположенная в Ge -подложке, наблюдалась на рентгеновских топограммах и непосред-

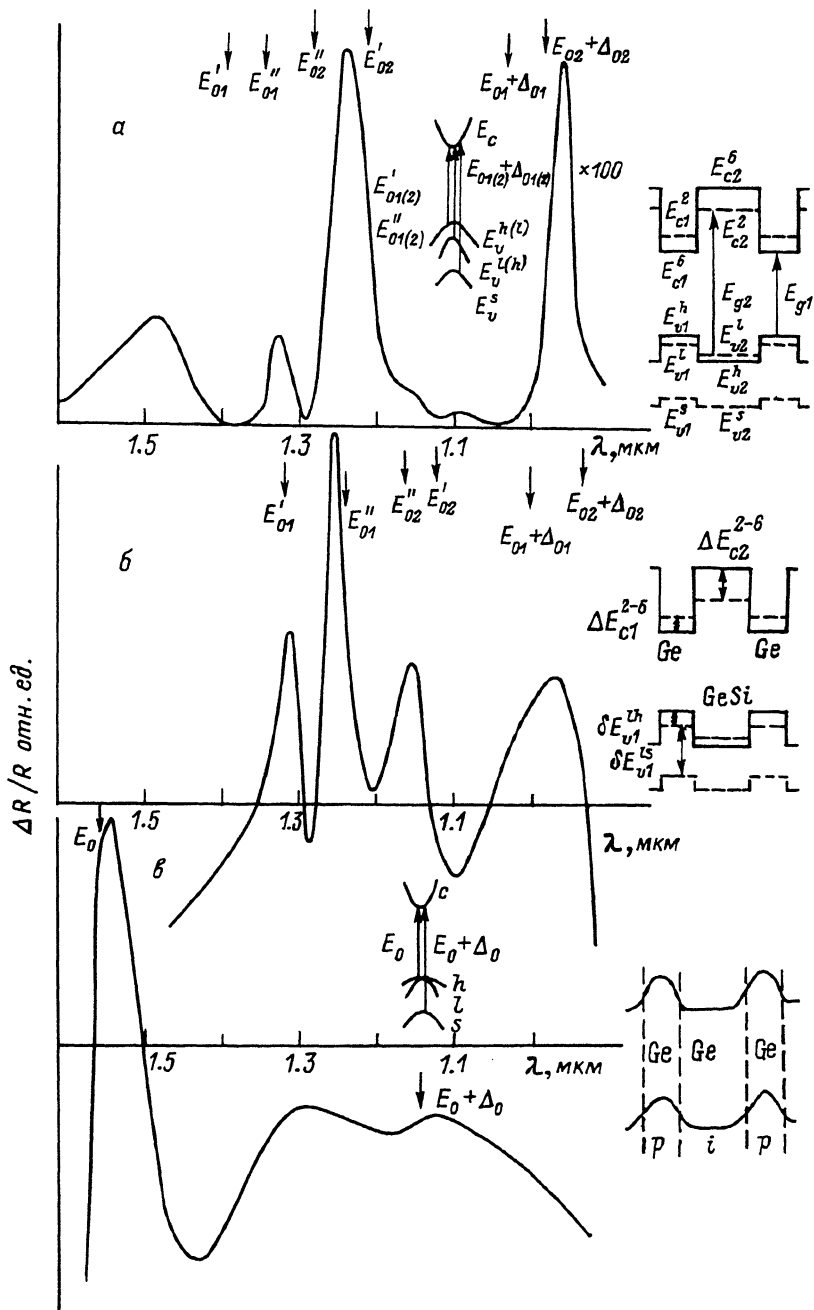


Рис. 1. Спектры электроотражения света и соответствующие им зонные энергетические диаграммы гетероэпитаксиальных (а, б) и гомоэпитаксиальной (в) сверхрешеток.

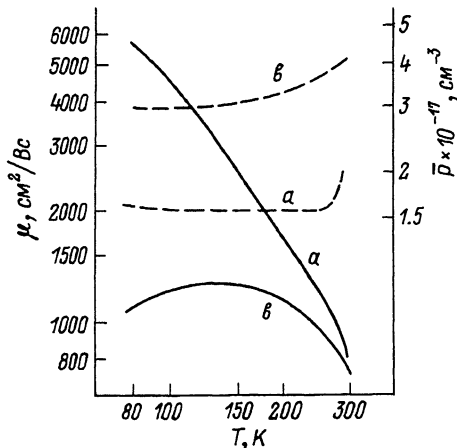


Рис. 2. Температурные зависимости холловской подвижности (сплошные линии) и концентрации дырок (штриховые линии) для гетероэпитаксиальной (а) и гомоэпитаксиальной (б) сверхрешеток.

ственно выявилась методом малоуглового клина при химическом травлении.

В СР на основе Si ($Si - Si_{1-x}Ge_x$) [2] электроны локализируются в слоях Si , дырки — в слоях твердого раствора, обнаруживая низкую дырочную подвижность вдоль плоскости роста структуры. В СР на основе Ge ($Ge - Ge_{1-x}Si_x$), как следует из вида зонных диаграмм, приведенных на рис. 1, а, б, как электроны, так и дырки локализируются в слоях Ge . Поэтому в исследуемых структурах при селективном легировании слоев твердого раствора бором можно ожидать существенное увеличение дырочной подвижности при продольном транспорте. Механизм роста подвижности при этом связан как с разделением в пространстве свободных носителей заряда и центров рассеяния, так и с уменьшением эффективной массы дырок при расщеплении подзон вследствие упругой деформации слоев Ge [3]. Для проверки высказанных утверждений нами впервые было проведено исследование электрофизических характеристик СР $Ge - Ge_{1-x}Si_x$ дырочного типа проводимости. СР в пределах периода селективно легировались бором примерно на половину толщины слоя твердого раствора (в его середине). При проведении холловских измерений в этих структурах наблюдался рост дырочной подвижности с понижением температуры, несмотря на достаточно высокую ($\sim 10^{17}$ см⁻³) концентрацию дырок в СР. Этот факт указывает на преобладание фонованного механизма рассеяния носителей заряда в слоях Ge . Экспериментальная зависимость μ_x от lgT для образца „а“ (рис. 1) приведена на рис. 2 (сплошная линия). Здесь же для сравнения представлена аналогичная кривая (б), полученная от гомоэпитаксиальной СР (обр. „в“, рис. 1). В гомоструктуре

дырки в основном локализируются в р-области, обуславливая иной ход зависимости $\mu_x(T)$, связанный с рассеянием на примесных атомах. Зависимости средней концентрации дырок \bar{p} по структуре от температуры для образцов „а“ и „в“ приведены на рис. 2 штриховыми линиями.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.Н. Дроздову за предоставление рентгенодифракционных данных по образцам и А.В. Кожухову за проведение масс-спектрометрического анализа.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G o s s a r d A.C. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1982. V. 29. N 10. P. 1659.
- [2] V a n d e W a l l e C.G., M a r t i n R.M. // Phys. Rev. B. 1986. V. 34. N 8. P. 5621.
- [3] О р л о в Л.К., К у з н е ц о в О.А. Тезисы докладов 19 Межд. конференции по физике полупроводников. Варшава. 1988. We-P-68.

Поступило в Редакцию
1 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 21

12 ноября 1989 г.

06.3; 12

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ *AlGaAs* - ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ С ТОКОВЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ В РЕЖИМЕ ВНУТРЕННЕЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ

Е.Л. П о р т н о й, Н.М. С т е л ь м а х,
А.В. Ч е л н о к о в

1. Настоящая работа продолжает наши исследования пикосекундных инжекционных лазеров, полученных глубокой имплантацией тяжелых ионов в зеркала резонатора [1, 2]. В таких лазерах в режиме внутренней модуляции добротности достигаются рекордные параметры по мощности и длительности генерируемых световых импульсов [2]. В работе показано, что насыщающийся поглотитель, находящийся вблизи зеркала лазерного резонатора, существенным образом влияет также и на пространственные характеристики излучаемого импульса.

Эффект изменения пространственных характеристик иллюстрирует рис. 1. Ввиду порогового характера просветления условия генерации достигаются лишь в области максимума интенсивности спонтанного излучения.