

05;06;10;12

Выращивание дельта-легированных слоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии кремния с одновременной бомбардировкой поверхности роста низкоэнергетическими ионами

© Ш.Г. Шенгуров, В.Н. Шабанов, А.В. Шабанов

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию 23 сентября 1996 г.

В работе показана возможность получения высококачественных структур при использовании приложения к подложке потенциала для получения дельта-слоев *n*- и *p*-типа проводимости при низкотемпературном наращивании эпитаксиальных слоев из сублимирующих кремниевых источников, легированных сурьмой или галлием.

Дельта-легированные слои привлекают внимание исследователей в связи с возможностью формирования принципиально новых электронных приборов [1,2]. Обычно дельта-легированные слои кремния получают методом молекулярно-лучевой эпитаксии либо в сочетании с твердофазной эпитаксией [1,3,4], либо с применением низкоэнергетической ионной имплантации [5,6]. Это связано с необходимостью подавления присущих традиционной молекулярно-лучевой эпитаксии сегрегационных эффектов, из-за которых невозможно получение слоев с концентрацией примеси, близкой к пределу твердофазной растворимости, и резкими переходными областями. Однако использование в этих методах относительно высоких температур (≥ 650 °C) для отжига слоев увеличивает диффузионное размытие профиля концентрации легирующей примеси в дельта-слое.

С другой стороны, известно [7,8], что сегрегацию легирующей примеси можно уменьшить за счет приложения к подложке отрицательного потенциала в процессе работы при испарении кремния с помощью электронной пушки. Низкоэнергетические ионы Si^+ , образующиеся

при ионизации молекулярного потока, активируют захват примеси (в основном донорной) из адслоя. Заметная термоионная эмиссия была установлена и при сублимации кремния [9,10]. Нами наблюдался эффект увеличения коэффициента переноса как донорной, так и акцепторной примеси при эпитаксиальном наращивании кремния с приложением отрицательного потенциала к подложке [10–13].

В данной работе показана возможность использования приложения к подложке потенциала для получения дельта-слоев *n*- и *p*-типа проводимости при низкотемпературном наращивании эпитаксиальных слоев из сублимирующих кремниевых источников, легированных сурьмой или галлием.

Наращивание слоев проводили по методике, описанной в [10–13]. Источниками потоков кремния и легирующей примеси служили прямоугольные бруски кремния, вырезанные из монокристаллов марки КЭС-0.01, КДГ-0.06 или КДГ-0.005. В качестве подложек использовали прямоугольные пластины кремния марок КЭФ-0.005 или КДБ-0.01 с ориентацией (110) и (100). Подложку и источники располагали в ростовой камере параллельно друг другу и нагревали пропусканием тока. Скорость роста слоев составляла $\sim 0.8\text{--}0.9$ н/с, давление остаточных газов при наращивании слоев не превышало $1.3 \cdot 10^{-5}$ Па.

После высокотемпературной (при 1330°C) очистки поверхности подложки от пассивирующей окисной пленки температуру снижали до 700°C и проводили наращивание буферного слоя толщиной ~ 1 мкм. За время его наращивания температуру подложки продолжали снижать до $\sim 520^\circ\text{C}$. После этого к подложке прикладывали отрицательный относительно источника потенциал $V = 30\text{--}300$ В на время $t = 3$ с и продолжали рост слоя. После отклонения потенциала наращивали слой толщиной 30–200 нм.

На рис. 1 приведены данные вторично-ионно-массового спектроскопического (ВИМС) анализа о распределении сурьмы по глубине эпитаксиальной структуры, выращенной на Si (100) кратковременным приложением потенциала $V = -100$ В. Структура состояла из буферного слоя толщиной 1 мкм, δ -слоя и верхнего слоя толщиной 60 нм. На профиле виден один пик, соответствующий росту концентрации примеси в момент приложения потенциала, и один пик вблизи поверхности слоя, который связан с накоплением сурьмы на поверхности роста в результате ее сегрегации и составляет несколько долей монослоя [14].

Из-за эффекта ионного перемешивания ВИМС-профили не позволяют непосредственно оценить толщину δ -слоя. Однако можно видеть,

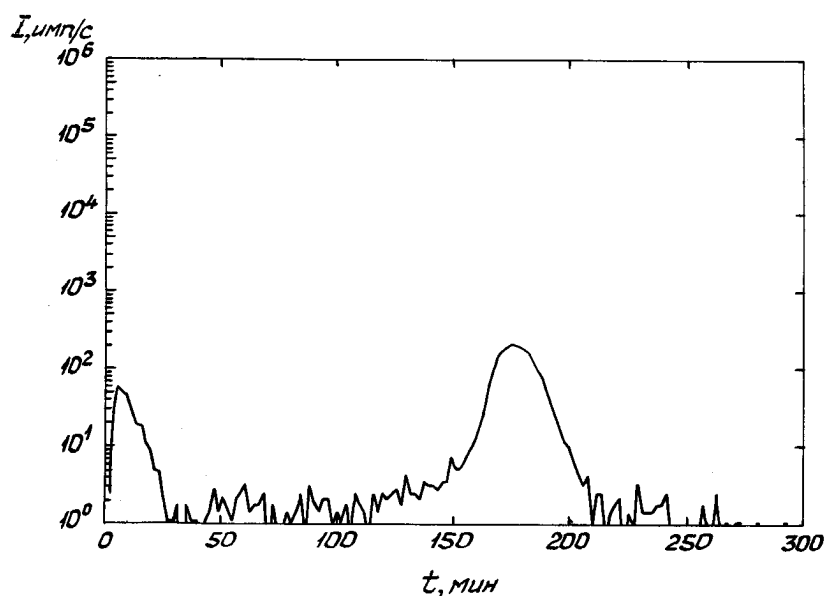


Рис. 1. ВИМС-профиль распределения сурьмы по толщине эпитаксиального слоя кремния, выращенного с кратковременным (3с) приложением к подложке потенциала $V = -100$ В.

что пик внутри эпитаксиальной структуры и пик у поверхности близки по ширине и высоте, что указывает на малую (менее 8 нм) толщину внутреннего легированного слоя и достаточно высокую концентрацию примеси в нем.

Данные вторично-ионно-массового спектроскопического анализа указывают также на резкость границы раздела δ -слоя. Следует отметить, что концентрация примеси в верхнем слое близка концентрации в буферном слое.

Аналогичные ВИМС-профили были получены и для слоев, легированных галлием. На рис. 2 приведен расчетный профиль концентрации дырок в δ -слое для двумерной концентрации электрически активной примеси $N_s = 5.64 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и фоновой концентрации акцепторов $N_a = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Там же нанесены экспериментально измеренные значения концентрации, определенные из C-V-измерений. Наблюдается,

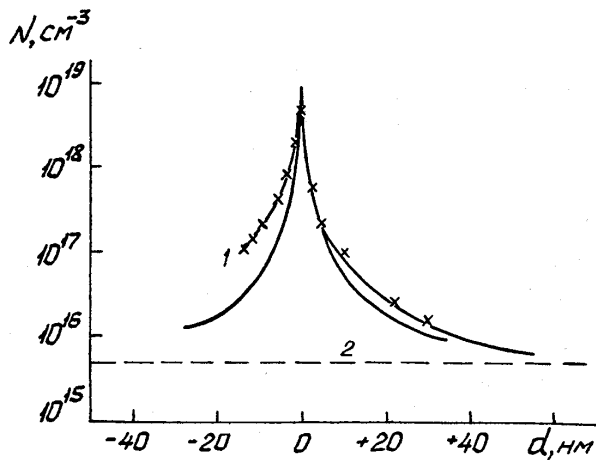


Рис. 2. Расчетный профиль концентрации дырок в дельта-слое (сплошная кривая), измеренный C-V-профилометром профиль дырок (1) и фоновая концентрация акцепторов (2).

на наш взгляд, удовлетворительное согласие рассчитанных и измеренных значений, особенно в области высоких концентраций. Асимметрия измеренного профиля, вероятно, связана с некоторой асимметрией в легировании δ -слоя. Кроме того, в области низких концентраций легирующей примеси ($< 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) приближение δ -легирования, по видимому, не выполняется.

Установлено также, что с повышением величины прикладываемого к подложке потенциала максимальная концентрация примеси несколько увеличивается. Так, в случае легирования слоев галлием приложение к подложке потенциала $V = -300 \text{ В}$ приводило к повышению концентрации приблизительно в 2.7 раза по сравнению со случаем $V = -100 \text{ В}$.

Проведенные C-V-измерения структур с δ -легированными слоями показали, что максимальные значения слоев концентрации составляли: в слоях n -типа $\sim 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, а в слоях p -типа проводимости — $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при использовании источника кремния марки КДГ-0.005. По данным C-V-измерений профили концентрации носителей заряда оказываются очень резкими (полуширина профиля дырок составляет $\sim 2 \text{ нм}$).

Все слои, независимо от уровня легирования, были монокристаллическими: электронограммы содержали только Кикучи-линии. Слои с поверхностной концентрацией $N_s \leq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при исследовании методом электронной микроскопии на просвет показали небольшую плотность дислокаций ($\sim 10^3 \text{ см}^{-2}$), в то время как в слоях с концентрацией $N_s \sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ обнаружено скопление дислокационных петель с плотностью $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Формирование резких пиков концентрации примеси в эпитаксиальных слоях при наращивании их с импульсным приложением потенциала мы объясняем следующим образом. Известно, что галлий и сурьма являются теми примесями, которые сегрегируют на поверхности при низких температурах роста [4,14,15]. В результате на поверхности растущего слоя всегда присутствует тонкий адслой примеси. Приложение к подложке отрицательного потенциала приводит к тому, что под действием бомбардировки ионами примесь из адслоя начинает эффективно захватываться растущим слоем. Как было нами установлено ранее [13], степень ионизации падающего на подложку потока кремния составляет 10^{-7} – 10^{-6} . Следовательно, за время роста легированного слоя доза ионов не превышала 10^{10} см^{-2} , т.е. на каждый падающий ион приходится ~ 50 атомов захваченной слоем примеси. Часть атомов встраивается в слой за счет легирования атомами отдачи [14]. Однако при незначительном потоке низкоэнергетических ионов существенное увеличение концентрации внедренной примеси таким образом объяснить невозможно. Вероятно, более существенным является активация процесса захвата примеси, например за счет перестройки поверхности и генерации поверхностных дефектов. К подобным выводам приходили и другие исследователи, проводившие аналогичные эксперименты с использованием больших энергий и потоков ионов [7,8]. Увеличение максимальной концентрации примеси с повышением величины потенциала связано, по-видимому, с увеличением плотности дефектов, генерируемых в приповерхностном слое при бомбардировке более энергичными ионами, а также с эффектом фокусировки ионов.

Таким образом, за счет использования ионной составляющей в молекулярном потоке из сублимирующего кремниевого источника и приложения к подложке небольшого по величине отрицательного потенциала можно формировать при низкой температуре роста ($\sim 520^\circ \text{C}$) δ -легированные слои с поверхностной концентрацией $\sim 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для слоев n -типа проводимости и $\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для слоев p -типа проводимости.

Список литературы

- [1] *Van Gorkum A.A., Nakagawa K., Shiraki Y.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P. 2485.
- [2] *Dohler G.H.* // Surf. Sci. 1978. V 73. P. 97.
- [3] *Зотов А.В., Саранин А.А., Лившиц В.Г., Храпцова Е.А.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 24. С. 1.
- [4] *Стенин С.И., Кантер Б.З., Никифоров А.И.* // Рост кристаллов. 1990. Т. 18, С. 81.
- [5] *Denhoff M.W., Jackman T.E., McCaffrey J.P. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. P. 1332.
- [6] *Djebbar N., Gutierrez J., Charki H. et al.* // Thin Solid Films. 1990. V. 184. P. 37.
- [7] *Kubiak R.A.A., Leong W.Y., Parker E.H.I.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 46. P. 565.
- [8] *Schaffler F., Jorke H.* // Thin Solid Films. 1990. V. 184. P. 75.
- [9] *Кожухов А.В., Кантер Б.З., Туровский Б.М., С.М. Чесноков* // Поверхность. 1989. Т. 3. С. 160.
- [10] *Павлов П.В., Шабанов В.Н., Шенгуров В.Г., Кожухов А.В.* // Поверхность. 1990. Т. 11. С. 153. 1990.
- [11] *Шенгуров В.Г., Шабанов В.Н.* // Поверхность. 1993. Т. 12. С. 98.
- [12] *Шенгуров В.Г., Шабанов В.Н.* // Высокочистые вещества. 1995. Т. 2. С. 52.
- [13] *Шенгуров В.Г., Шабанов В.Н.* // Тез. докл. XII Международной конф. "ВИП-95" (Россия, Звенигород, 1995). С. 164.
- [14] *Becker G.E., Veap J.C.* // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. P. 3395.
- [15] *Ota Y.* // J. Electrochem. Soc. 1977. V. 124. P. 1795.