

05;06.1

О механизмах термостабильности электрофизических свойств перекомпенсированного n -Si(B, S)

© М.С. Юнусов, М. Каримов, П.А. Халиков

Институт ядерной физики АН РУ, Ташкент

Поступило в Редакцию 13 апреля 1999 г.

Методом термоотжига исследовались образцы кремния с различными концентрациями серы. При этом установлено, что температура распада центров серы зависит от концентрации атомов серы (N_s) в перекомпенсированном кремнии. Причем с уменьшением расстояния между примесями ($N_s^{-1/3}$) температура распада повышается. Эффект объясняется особенностями распределения атомов компенсирующих примесей серы внутри области флуктуации, которые образуются в кремнии в процессе легирования.

Исследованию термостабильности примесных центров в легированном кремнии с глубокими энергетическими уровнями посвящено много работ [1–8]. Однако физические процессы, происходящие в таких материалах, до сих пор не выяснены. В работах [1–3] методом DLTS исследованы примесные центры Au, Pt, Ir и Rh в n - и p -Si до и после повторной термообработки и было показано, что наблюдаемые концентрации примесных центров в кремнии уменьшаются или трансформируются в другие центры при менее 400°C (в данном случае концентрации примесных центров ($N_n \simeq 10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)). В работах [4–8] распад примесных центров (Au, Pt, Ir, Rh и S) при концентрациях $N_n \simeq 10^{15} \div 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ наблюдали при более 600°C .

Целью данной работы является выявление влияния концентрации центров серы на термостабильность проводимости перекомпенсированного $n\text{-Si}(B, S)$.

Выбор примеси серы в кремнии обусловлен тем, что, во-первых, примеси серы образуют донорные центры в верхней половине запрещенной зоны кремния и, во-вторых, большой растворимостью серы ($\sim 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ при 1320°C). Эти два фактора позволяют получать из p -типа n -тип кремния (перекомпенсированный $n\text{-Si}(B, S)$) в широком диапазоне удельного сопротивления (от 1 до $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$). В данном случае атомы серы являются основной легирующей примесью в $n\text{-Si}(B, S)$. Установление температуры перехода из n - в p -тип проводимости (T_p) при термообработке позволяет установить зависимость концентрации центров серы от температуры стабилизации ($T_c = T_p$) по проводимости материала.

В качестве исходного материала использовался кремний p -типа, выращенный методом Чохральского, с удельным сопротивлением $\sim 45 \Omega \cdot \text{cm}$ и плотностью дислокаций $\sim 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$.

Легирование кремния примесью серы осуществлялось методом термодиффузии в интервале $1000\text{--}1300^\circ\text{C}$ в течение $\sim 20 \text{ h}$ в открытой кварцевой ампуле с последующим охлаждением со скоростью в интервале $\sim 250 \text{ grad/min}$, при которой наблюдалась конверсия типа проводимости из p - в n -тип.

Исследовался изохронный отжиг в $n\text{-Si}(B, S)$ интервале температур $300\text{--}900^\circ\text{C}$, время выдержки при заданной температуре отжига составляло $\sim 20 \text{ min}$. Омические контакты были получены путем диффузии фосфора до легирования кремния серой. Для определения концентрации и типа проводимости кремния использовались стандартные методы измерений коэффициента Холла [9].

В таблице приведены результаты исследования зависимости концентрации центров серы в перекомпенсированном кремнии от температуры перехода из n - в p -тип проводимости (T_p). Видно из таблицы, что с ростом концентрации атомов серы T_p сдвигается в сторону повышения температуры. Причиной этого мы считаем неравномерное распределение атомов серы в объеме перекомпенсированного кремния, т.е. эти образцы отличаются друг от друга размером примесной флуктуации.

Зависимость температуры стабилизации по проводимости в n -Si(B, S) от концентрации центров серы

Концентрация центров серы (N_s), cm^{-3}	$6 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$
Температура конверсии (T_p), $^{\circ}\text{C}$	680	700	730	780

Повторная термообработка (при которой образуются вакансии — V и междоузельные примесные атомы серы S_i)¹ до температуры полного распада $T_{\text{рас}}$ ($T_p \simeq T_{\text{рас}}$) приводит к дополнительной напряженности решетки: после ухода атома серы из узла в междоузлие ранее растянутая область (радиус атома серы меньше, чем радиус атома кремния [10]; в этом случае решетка, расположенная в области флуктуации, растянута) становится еще более растянутой. Напряженность решетки компенсируется, в данном случае, междоузельным атомом S_i и закрепляется внутри области флуктуации, т. е. освобожденные V и S_i , мигрируя внутри области флуктуации, имеют достаточную вероятность встречи V с S_i . В результате S_i переходит в узельную конфигурацию или создается новый комплекс $[V + S_i]$. Поэтому, на наш взгляд, с ростом N_s наблюдается сдвиг T_p в сторону высоких температур. Чем больше концентрация примеси в области флуктуации, тем меньше расстояние между атомами серы ($N^{-1/3}$) и больше радиус действия упругих сил, и в результате наблюдается повышение термостабильности по проводимости компенсированного кремния (в данном случае $N^{-1/3} \simeq (0.94 \div 2) \cdot 10^{-5} \text{ cm}$). Предлагаемый механизм, объясняющий термостабильность в компенсированном кремнии, также подтверждает результаты, приведенные в работах [1–3]. В этих работах расстояние между примесными атомами $N^{-1/3} < 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$.

Условие эффективности обсуждаемого механизма состоит в том, чтобы расстояние между примесями $N^{-1/3}$ было меньше, чем расстояние действия упругих сил ($R_{\text{уп.}}$), т. е. $N^{-1/3} < R_{\text{уп.}}$. При повышении температуры происходит одновременное высвобождение всех атомов серы из вакансий и механизм перестает работать.

¹ В объеме легированного материала имеется несколько типов примесных флуктуаций. Считалось, что распад центров серы начинается в флуктуации, где расстояние между атомами серы больше, чем в других флуктуациях.

Следует отметить, что при анализе зависимости сдвига температуры полного распада от концентрации атомов примесей учитывались дилатационные заряды, т.е. считалось, что в объеме материала возникающие сжатые и растянутые области (в результате термообработки до температуры полного распада) имеют противоположные дилатационные заряды.

Таким образом, в результате проведенного анализа предложен механизм, объясняющий зависимость температуры полного распада центров серы в кремнии от их концентрации, что обусловлено различной флуктуацией атомов серы: чем больше атомов серы в флуктуации, тем больше вероятность закрепления продукта распада внутри области флуктуации в объеме $n\text{-Si}(B, S)$.

Небезынтересно отметить, что эффект зависимости температуры отжига одного и того же центра (в данном случае А-центра [11] зависит от степени упорядоченности полупроводника (т.е. с накоплением дозы облучения). Однако радиационные условия эксперимента дают возможность проявления альтернативных механизмов [12].

Список литературы

- [1] *Lemke H.* // Phys. Stat. Sol. 1985. A92. N 2. P. K139–K143.
- [2] *Lemke H.* // Phys. Stat. Sol. 1985. A91. N 1. P. 143–152.
- [3] *Lemke H.* // Phys. Stat. Sol. 1987. A101. N 1. P. 193–203.
- [4] *Бадалов А.З.* // ФТП. 1972. Т. 6. N 5. С. 789–792.
- [5] *Юнусов М.С., Каримов М.* // ДАН АН УзССР. 1976. № 8. С. 19–21.
- [6] *Юнусов М.С., Каримов М., Каримов А.А., Кочкаров Р.Х., Оксенгенд-ле Б.Л.* // ДАН АН УзССР. 1991. № 3. С. 25–26.
- [7] *Лебедев А., А., Соколов Н.А., Уринбаев Б.М.* // ФТП. 1981. Т. 15. № 8. С. 1519–1522.
- [8] *Кустов В.Е., Трипачко Н.А.* Распад пересыщенного твердого раствора платины в кремнии. // В сб.: Свойства легированных полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1990. С. 227–229.
- [9] *Baleshta T.M., Keys J.D.* // Amer. J. Phys. 1968. V. 36. P. 23–26.
- [10] *Бацанов С.С.* Электроотрицательность элементов и химическая связь. Новосибирск: СО АН СССР, 1962. 196 с.
- [11] *Tanaka T., Inuishi J.* // J. Phys. Soc. Japan. 1964. V. 19. N 2. P. 167–174.
- [12] *Смирнов Л.С., Соловьев С.П., Стась В.Ф., Харченко В.А.* Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск: Наука, 1981. 181 с.