

О. М. БОРИСОВ, В. В. ЛИТВИНОВ, В. Б. ОДЖАЕВ, В. И. УРЕНЕВ,
А. Л. ФЕЙГЕНСОН

ЯВЛЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ОТЖИГА В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СУРЬМОЙ СЛОЯХ КРЕМНИЯ

Предложенный Гиббонсом механизм отрицательного отжига [1] заключается в том, что внедренные атомы примеси захватываются линейными дислокациями и дислокационными петлями, образующимися в процессе термообработки. При этом в основном адсорбируются должны атомы примесей, которые значительно отличаются размерами от атомов основы. Такими примесями в кремнии могут быть бор и сурьма. Явление отрицательного отжига хорошо известно в имплантированном бором кремнии [2, 3] и, на наш взгляд, лучше всего может быть объяснено с помощью выдвинутой модели [1]. Однако для ее подтверждения необходимы дополнительные экспериментальные данные и, в частности, по отжигу слоев кремния, легированных ионами сурьмы. Практический интерес представляет также исследование электрофизических свойств таких слоев на различных стадиях отжига, поскольку эта примесь используется в производстве полупроводниковых структур, однако, этот вопрос изучен явно недостаточно. Особенно это относится к области доз, ниже критической дозы аморфизации. Кинетика отжига в настоящей работе исследовалась поэтому в интервале температур 400—1000°С и доз имплантации $3 \cdot 10^{13}$ — $6 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Внедрение ¹²²Sb (60 кэВ) осуществлялось при комнатной температуре в разориентированные относительно ионного пучка пластины Si марки КДБ-7,5, вырезанные по плоскости (111) и обработанные по обычной технологии. Плотность ионного тока составляла 2 мкА/см². Отжиг проводился в вакууме. Поверхностная концентрация N_s , объемная концентрация n и подвижность μ носителей заряда находились из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Послойное стравливание анодно-окисленных слоев Si толщиной примерно 50 Å позволяло определить профиль распределения этих параметров по глубине.

Результаты измерения N_s в процессе изохронного отжига представлены на рис. 1. Видно, что в области температур 500—550°С для всех доз имплантации наблюдается резкое увеличение числа носителей. Поскольку при этих температурах происходит отжиг аморфного слоя [4], можно предположить, что активация атомов Sb связана с рекристаллизацией аморфных областей. Для интервала доз $6 \cdot 10^{13}$ — $2 \cdot 10^{15}$ см⁻² N_s в рекристаллизованном слое изменяется пропорционально дозе с близким к единице коэффициентом использования. Дальнейшее повышение дозы не ведет к увеличению числа носителей в слое и при дозе $6 \cdot 10^{15}$ см⁻² коэффициент использования уже равен 0,3. Проведенный на этих образцах изотермический отжиг при 600°С в интервале длительностей 10—150 мин практически не изменил предельного значения N_s . При этом предельная объемная концентрация электронов в максимуме распределения $\sim 2,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ и значительно превышает термически равновесное значение (рис. 2, кривая 1). Повышенная растворимость имплантированных атомов сурьмы наблюдалась ранее [4] и объясняется большой концентрацией неравновесных вакансий, освобождающихся в процессе рекристаллизаций аморфного слоя.

С увеличением температуры отжига неравновесная концентрация активной Sb уменьшается. Таким образом, уже для $t_{отж} \geq 650^\circ\text{C}$ становится заметным выход атомов сурьмы из узлов, связанный с установлением термодинамического равновесия. Эксперименты по обратному рассеянию [5] позволили установить, что неактивная часть атомов диффундирует к поверхности.

Для доз имплантации, непосредственно перед сплошной аморфизацией, в области температур 500—600°С наблюдается уменьшение числа

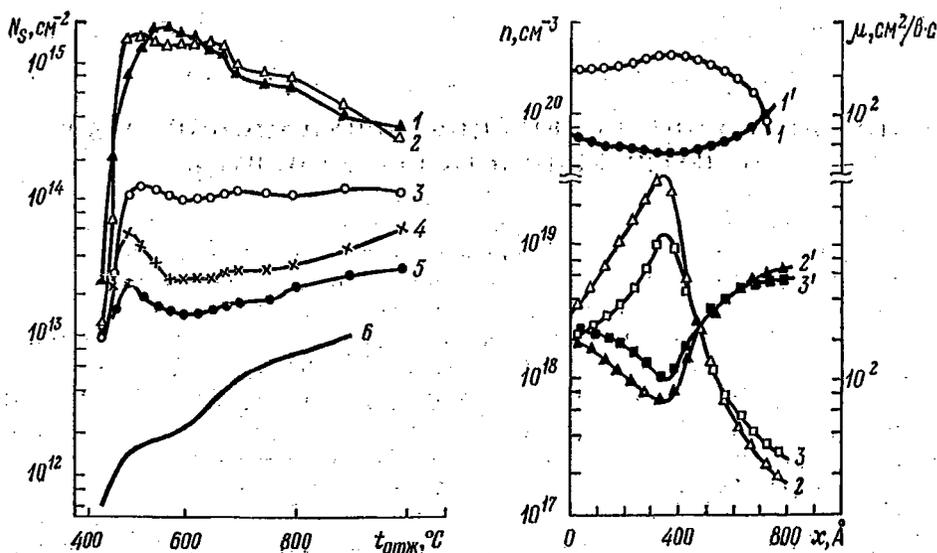


Рис. 1. Зависимость N_s от температуры изохронного отжига (10 мин) для различных доз имплантации:

1 — $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 2 — $2 \cdot 10^{15}$; 3 — $1,5 \cdot 10^{14}$; 4 — $6 \cdot 10^{13}$; 5 — $3 \cdot 10^{13}$; 6 — (из работы [6]) — $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

Рис. 2. Зависимость профилей $n(x)$ (кривые 1, 2, 3) и $\mu(x)$ (1', 2', 3') от дозы имплантации и режима отжига:

1, 1' — $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, 625°C , 30 мин; 2, 2' — $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, 500°C , 10 мин; 3, 3' — $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, 600°C , 10 мин

электронов с последующим их восстановлением при $\sim 800^\circ\text{C}$. При этом степень отрицательного отжига увеличивается с дозой от 0,45 при $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ до 0,6 при $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Представленные на рис. 2 профили концентрации и подвижности носителей заряда показывают, что уменьшение N_s вызвано переходом атомов Sb в электрически неактивное состояние. При дозах, превышающих критическую дозу сплошной аморфизации ($\geq 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), отрицательный отжиг не проявляется.

Характеристики отрицательного отжига соответствуют таковым для имплантированного бором кремния [2] и свидетельствуют в пользу предложенного Гиббсом механизма. Можно сделать вывод о том, что предполагаемые им дислокации и дислокационные петли образуются в результате отжига изолированных аморфных областей. С понижением дозы вклад этих областей в общее резупорядочение уменьшается, и уже при дозе $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ эффект отрицательного отжига не обнаруживается [6]. В этом случае электрофизические свойства имплантированного слоя определяются в основном присутствием радиационных дефектов, стабильных вплоть до 800°C [6]. Такие дефекты наблюдались также при облучении кремния ионами бора [7] и быстрыми реакторными нейтронами [8].

ЛИТЕРАТУРА

- Gibbons J. F.— Proc. IEEE, 1972, v. 60, p. 1062.
- Seidel T. F., MacRae A. U.— Rad. Effects, 1971, v. 7, p. 1.
- Bichnell R. W., Allen R. M.— Rad. Effects, 1970, v. 6, p. 1.
- Мейер Д. ж. и др. Ионное легирование полупроводников.— М., 1973, с. 296.
- Davies J. A. et al.— Can. Journ. Phys., 1967, v. 45, p. 4053.
- Johansson N. G. E., Mayer J. W.— Solid State Electron., 1970, v. 13, p. 123.
- Челядинский А. Р., Марченко Г. М.— Тез. докл. Всесоюзной конференции. Радиационные эффекты в твердых телах.— Ашхабад, 1977, с. 156.
- Semenyuk A. K. et al.— Phys. Stat. sol. (a), 1971, v. 7, p. 51.