

ЭЛЕКТРОФИЗИКА ПРЕЦИПИТАТОВ КИСЛОРОДА В ПЛАСТИНАХ КРЕМНИЯ

В.М.Звероловлев, В.А.Миляев, В.А.Никитин, В.Н.Степченко, П.Г.Угольцев, Б.Л.Эйдельман

Методом СВЧ релаксометрии показано, что в кремнии р-типа при достижении радиуса кислородных преципитатов 30 нм время жизни неравновесных носителей скачкообразно уменьшается: дальнейший рост преципитатов приводит к его увеличению. Концентрация образующихся центров прилипания электронов связана в первом порядке с размерами кислородных преципитатов, во втором - с их плотностью. Можно заключить, что действие заряда, образующегося на границе преципитата, простирается на весь межпреципитатный объем.

Практически при любых режимах термообработки в кремнии, выращенном методом Чохральского, возникают кислородные преципитаты, существенно влияющие на рекомбинацию неравновесных носителей. В кремнии р-типа с кислородными преципитатами наблюдается эффект прилипания неравновесных носителей, причем концентрация центров прилипания (ЦП) коррелирует с плотностью кислородных преципитатов /1/. Объемное время жизни неравновесных носителей τ в общем случае определяется не только преципитацией кислорода, но зависит в большей степени от исходного распределения примесей в образце и температурного режима формирования преципитатов, т.е. от чистоты межпреципитатного объема. Таким образом, необходимы эксперименты, в которых изменения электрофизики пластин, не связанные непосредственно с преципитацией кислорода, минимальны.

В первом эксперименте исследовалась связь концентрации ЦП и эффективного времени жизни неравновесных носителей с плотностью преципитатов SiO_2 в слитке промышленного кремния р-типа КДБ-12. Слиток диаметром 100 мм разрезали вдоль оси его роста, совпадающей с направлением [100], по плоскости (110). Полученные прямоугольные пластины полировали по стандартной технологии до полного удаления нарушений. Затем пластины отжигали в атмосфере сухого кислорода по следующей программе: 700 °С (4 ч) + 900 °С (2 ч) + 1000 °С (0,5 ч). Далее с пластин сполировывали приповерхностный обедненный кислородом в результате отжига слой толщиной 25 мкм и селективным травлением выявляли дефекты, вызванные преципитацией кислорода. В соответствии с уменьшением концентрации исходного кислорода в слитке по его длине от затравки к концу наблюдалось изменение плотности дефектов, выявляемых селективным травителем.

В подтверждение результатов работы /1/ концентрация центров прилипания M увеличивалась в соответствии с увеличением поверхностной плотности дефектов N . Новым результатом явилось одновременное практически линейное увеличение времени жизни приблизительно от 3 мкс при $N = 10^5 \text{ см}^{-2}$ до 10 мкс при $N = 8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Это свидетельствует о том, что при прочих равных условиях интенсивность роста преципитатов, связанная с исходной концентрацией кислорода, оказывает геттерирующее действие на межпреципитатный объем.

Условный радиус преципитата можно рассчитать по формуле /2/: $r = [2DV_0(C - C_0)t]^{1/2}$, где $D = 0,23 \exp(-2,56/kT) \text{ см}^2/\text{с}$ - коэффициент диффузии кислорода в кремнии при температуре 800 - 1100 °С (kT измеряется в электронвольтах); $V_0 = 0,24 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$ - удельный объем атома кислорода; C - исходная концентрация кислорода в слитке; $C_0(T)$ - равновесная растворимость кислорода в кремнии при данной температуре отжига T ; t - время термообработки. Согласно /3/, величину C_0 можно аппроксимировать зависимостью $C_0 = 10^{21,5 - 5200/T}$. Подчеркнем, что в приведенном выше эксперименте преципитаты были выращены по одной температурной схеме при различных концентрациях исходного кислорода C , поэтому с увеличением концентрации кислородных преципитатов увеличивались также их размеры.

В следующем эксперименте длительности отжига при различных температурах подбирались таким образом, чтобы размеры формируемых преципитатов достигли 20 нм. Исследовались 10 пластин кремния р-типа КДБ-40, нарезанных из одной части слитка и приготовленных по стандартной технологии. Исходная концентрация кислорода в слитке по данным ИК спектроскопии составила $7,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Образец делился на четыре части, каждая из которых проходила одну из термообработок: (1) 850 °С, 42 ч, (2) 950 °С, 5 ч 40 мин, (3) 1000 °С, 2,5 ч, (4) 1100 °С, 1 ч. Плотность образующихся преципитатов с повышением температуры падает ввиду экспоненциального уменьшения числа зародышей преципитатов с радиусом выше критического. Отметим, что при размере преципитатов 20 нм плотность дефектов упаковки вокруг них настолько мала, что их невозможно выявить селективным травлением или секционной рентгеновской топографией. После измерений был проведен дополнительный отжиг (5) 1100 °С, 3 ч), увеличивающий размеры преципитатов до 40 нм без изменения их плотности. Секционные рентгеновские топограммы показали на этой стадии существенно большую плотность дефектов при начальной термообработке (1) и слабое уменьшение при режимах термообработки (2) – (4). Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимость τ и M от размеров преципитатов

Режим	R = 20 нм		R = 40 нм		
	τ , мкс	M, отн. ед.	τ , мкс	M, отн. ед.	N, 10^3 см^{-2}
1	$3,5 \pm 1,0$	$6,5 \pm 1$	$3,5 \pm 1$	12 ± 1	2000
2	20 ± 5	5 ± 1	$3,5 \pm 1$	9 ± 1	1,6
3	28 ± 4	6 ± 1	$3,5 \pm 1$	$9,5 \pm 1$	0,8
4	18 ± 4	7 ± 1	$3,5 \pm 1$	11 ± 1	0,8

Объемное время жизни неравновесных носителей зависит от концентрации преципитатов или от температуры формирования при размере преципитатов 20 нм и практически не зависит от этих параметров при размере 40 нм, т.е. при росте преципитата в этом диапазоне значений радиуса наблюдается существенное качественное изменение рекомбинационных свойств объема кремния. Этот факт полностью согласуется с работой [4], в которой на кремнии n-типа показано, что размер 30 нм является критическим для уменьшения времени жизни. Таким образом, можно утверждать, что процессы рекомбинации неравновесных носителей в кремнии p- и n-типа в условиях преципитации кислорода одинаковы.

Рассмотрим процессы прилипания. Отсутствие прилипания в кремнии n-типа при поверхностной концентрации преципитатов $10^4 - 10^6 \text{ см}^{-2}$ свидетельствует, что уровень прилипания находится недалеко от дна зоны проводимости и захватывает электроны. Исследование температурных зависимостей спада СВЧ фотопроводимости кремния с кислородными преципитатами показало, что прилипание осуществляется мелким уровнем, глубина залегания которого сравнима с kT , с крайне малым сечением захвата ($\sim 10^{-21} \text{ см}^2$) [5].

Эти факты согласуются с предположением о возникновении на границе преципитатов заряда [6, 7]. Можно считать, что граница преципитата SiO_2 (по аналогии с границей раздела плоского $\text{Si}-\text{SiO}_2$) обладает фиксированным положительным зарядом. В области объемного заряда происходит разделение неравновесных носителей. При этом электроны оказываются в потенциальной яме, а дырки длительное время перемещаются по объему кристалла, пока диффузионный ток из области объемного заряда не обеспечит им необходимое для рекомбинации число свободных электронов. С увеличением радиуса преципитата r сосредоточенный на нем заряд растет как r^2 , в то время как концентрация ЦП, как видно из таблицы, увеличивается пропорционально r . Из этого можно заключить, что разделение зарядов, генерированных светом – начальная стадия эффекта прилипания – происходит в пространстве между преципитатами; таким образом, концентрация центров прилипания связана с напряженностью поля в межпреципитатном объеме, которая убывает как $1/R^2$ (R – расстояние до преципитата). Из таблицы также видно, что концентрация ЦП, по крайней

мере в диапазоне 20 — 40 нм, слабо зависит от плотности кислородных преципитатов. Отсюда можно заключить, что действие объемного заряда простирается на весь межпреципитатный объем. Только в этом случае увеличение концентрации преципитатов окажет существенно меньший эффект по сравнению с увеличением заряда на преципитатах.

Таким образом, при изучении электрофизики кремния р-типа в условиях преципитации кислорода необходимо разделять процессы прилипания электронов и процессы рекомбинации электрона и дырки. Так же как и в кремнии п-типа, время жизни неравновесных носителей скачкообразно уменьшается при достижении радиуса преципитатов 30 нм. При прочих равных условиях дальнейший рост преципитатов оказывает геттерирующее действие на межпреципитатный объем и тем самым увеличивает время жизни. Концентрация образующихся центров прилипания электронов связана в первом порядке с размерами кислородных преципитатов, во втором — с их концентрацией. Это может объясняться разделением неравновесных носителей в межпреципитатном объеме в поле, связанном с возникновением заряда на границе преципитата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Думбров В. И. и др. МЭ, 17, № 1, 19 (1988).
2. Inoue N., Wada K., Osaka J. In: Semiconductor silicon, 1981, ed. Huff H. P., Krieger R. J., Takeishi Y. The Electrochem. Soc., Princeton, NY, p. 282.
3. Craven R. A. In: Oxygen precipitation in Czochralski silicon. Semiconductor Silicon, 1981, Minneapolis, ed. Huff H. P., p. 254.
4. Ohtaki R., Matsushita Y., Tajima M. 13th Int. Conf. on Defects in Semiconductors. 1984, Colorado, Calif., PA, 1985, p. 163.
5. Миляев В. А., Никитин В. А., Ширков А. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, 39 (1988).
6. Arinwande A. T., Plummer J. D. J. Electro-Chem. Soc., 134, № 10, 1565 (1987).
7. Henry A., Paurat J. L., Saminadayar K. Defects in semiconductors, Ed. by H. J. von Bardeleben, Materials Science Forum, v. 10 — 12, 1986, p. 985.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 22 июня 1988 г.