

РЕКОМБИНАЦИЯ В n -Si ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ И ОБЛУЧЕНИИ

Неймаш В. Б., Соснин М. Г., Шаховцов В. И., Шиндич В. Л.,
Ясковец И. И.

Методами емкостной спектроскопии глубоких уровней, эффекта Холла и нестационарной фотопроводимости исследовано влияние термообработки (ТО) в области температур $300 \div 800$ °С на поведение времени жизни неосновных носителей τ и скорости накопления A -центров в промышленном n -Si. Обнаружены увеличение τ в результате ТО и корреляция его увеличения с величиной исходного τ .

Обнаружена немонотонная зависимость константы деградации при γ -облучении от температуры предварительной ТО при неизменной скорости накопления A -центров.

Полученные результаты объясняются распадом твердого раствора глубоких примесей и изменением рекомбинационной активности A -центров в результате накопления электрически активных термодфектов. Получено удовлетворительное согласие расчета с экспериментом.

Влияние различных термообработок (ТО) на рекомбинационные свойства кремния исследуется давно и достаточно подробно (см., например, [1]). Однако результаты, полученные различными авторами в разные годы, не всегда согласуются. Одной из причин этого, по-видимому, является улучшение структурного совершенства современного монокристаллического кремния по сравнению с применяемым в более ранних исследованиях. В связи с этим представляет интерес изучение влияния ТО на рекомбинационные свойства современного промышленного кремния.

Относительно слабо изучено также влияние предварительной ТО на изменение рекомбинационных свойств кремния при последующем облучении высокоэнергетическими частицами. Эта проблема особенно важна для развития радиационной технологии обработки полупроводников и для повышения радиационной стабильности полупроводниковых приборов. Это обусловлено тем, что реальные монокристаллы кремния и приборы на их основе имеют тепловую предысторию, которая может влиять на процессы радиационного дефектообразования [2].

В данной работе изучено влияние различных температур ТО на рекомбинационные параметры промышленного n -кремния, а также на их деградацию при последующем γ -облучении ^{60}Co .

Для экспериментов использовался кремний КЭФ-60 с содержанием кислорода и углерода $(7 \div 9) \cdot 10^{17}$ и $< 5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ соответственно. Измерение τ проводилось по релаксации неравновесной фотопроводимости в условиях малой инжекции [3]. Из одного слитка были подобраны три группы образцов с различной величиной τ_0 . После проведения стандартной химической очистки образцы подвергались изохронному (5 ч) отжигу на воздухе в диапазоне температур $300 \div 800$ °С со скоростью охлаждения < 3 К/мин. При каждой температуре ТО одновременно отжигались несколько образцов из каждой группы. На рис. 1 показано влияние температуры ТО на τ . Видно, что рост τ в результате ТО данного материала происходит вплоть до 700 °С, после чего начинается спад. На аналогичной зависимости, полученной в работе [4], резкий спад τ начинается уже при 500 °С. Это дало основание авторам [4] полагать, что рост τ при ТО обусловлен взаимодействием глубоких примесей (ГП), определяющих

рекомбинацию в таком материале [5] с термодонорами, которые образуются при температурах ниже 500 °С. Такая интерпретация противоречит данным рис. 1, так как рост τ продолжается и после отжига низкотемпературных термодоноров (ТД). Одно из возможных объяснений результатов, приведенных на рис. 1, состоит в том, что увеличение τ связано с распадом пересыщенного твердого раствора неконтролируемых ГП при такой ТО. Очевидно, что процесс распада в значительной мере зависит от примесной и дефектной структуры кристалла. Несовпадение на 200 К температур максимального увеличения τ в работе [4] и нашей в таком случае можно объяснить различием примесного и структурного составов используемых материалов. Обращает на себя внимание тот факт, что увеличение τ пропорционально величине исходного τ_0 (рис. 1).

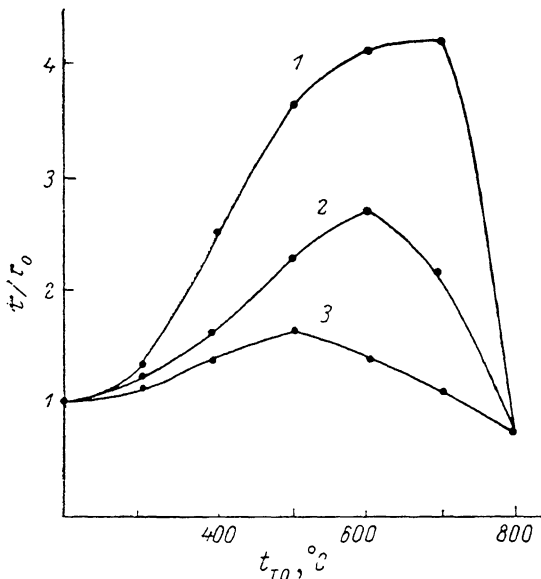


Рис. 1. Зависимость относительного изменения τ от температуры ТО.

τ_0 , мкс: 1 — 65, 2 — 50, 3 — 30.

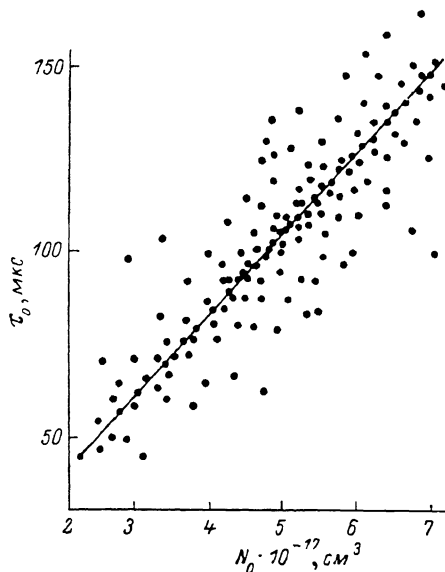


Рис. 2. Зависимость исходного τ_0 от содержания ИК активного кислорода.

Наблюдается также корреляция между значением исходного τ_0 и положением максимума на кривых (рис. 1). При уменьшении τ_0 максимум сдвигается в сторону более низких температур. Так как исходное τ_0 в определенной мере служит показателем совершенства кристалла, то оба эти факта свидетельствуют в пользу высказанного предположения.

На рис. 2 приведена зависимость τ_0 от содержания кислорода в слитке исходного материала. Видно, что в среднем исходное τ_0 пропорционально содержанию примеси кислорода. В работе [6] показано, что кислородные преципитаты являются геттерами для рекомбинационно-активных центров. Поэтому зависимость τ_0 от N_0 можно объяснить распадом ГП в ходе охлаждения слитка после выращивания на кислородных преципитатах как дополнительных центрах распада. Это также может служить свидетельством в пользу предположения о роли распада ГП в поведении τ при ТО.

Термообработанные в указанных режимах образцы вместе с контрольными подвергались γ -облучению при $t < 50$ °С четырьмя дозами по 10^5 Р, что соответствует линейному участку дозовых зависимостей τ . По дозовым зависимостям τ была определена константа деградации времени жизни $K_\tau = \frac{1}{\Phi} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right)$ для каждой группы образцов. Зависимость K_τ от температуры предварительной ТО приведена на рис. 3 (кривая 4). На тех же образцах были изготовлены барьеры Шоттки и записаны спектры DLTS. Из анализа DLTS спектров получены зависимости концентраций А-центров (кривая 1) и термодоноров (кривая 2) от температуры предварительной ТО. Там же приведены данные о концентрации ТД,

полученные из холловских измерений (кривая 3). Следует отметить, что наличие пиков ТД в спектрах DLTS образцов, обработанных при всех исследованных температурах вплоть до 800 °С, свидетельствует о том, что ТД вводятся при медленном охлаждении образцов в ходе прохождения области температур 480–300 °С.

К интересным выводам приводит сопоставление кривых на рис. 3. Как видно из рис. 3, эффективность введения А-центров (основных радиационных центров рекомбинации в исследуемом материале) практически не зависит от температуры предварительной ТО. Однако на зависимости K_{τ} от температуры предварительной ТО наблюдаются два резко выраженных пика. Причем положение этих пиков по температуре совпадает с максимумами концентрации ТД. Эти максимумы соответствуют областям температуры наиболее интенсивного образования кислородных термодоноров. Корреляция зависимостей K_{τ} и концентрации термодоноров свидетельствует об изменении эффективности рекомбинации на радиационных дефектах в результате смещения уровня Ферми при введении ТД. Будем считать, что рекомбинация в исходном материале определяется глубокими примесями, зарядовое состояние которых при смещении уровня Ферми изменяется незначительно. Примем, что термодонор является гелиоподобным центром с уровнями $E_c - 0.07$ и $E_c - 0.15$ эВ [7]. Положим также, что в об-

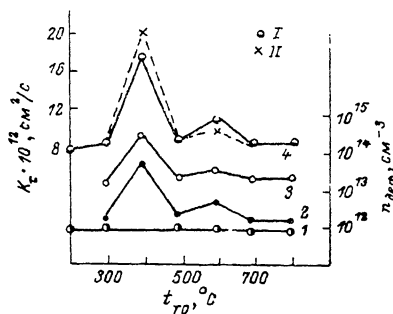


Рис. 3. Зависимости от температуры предварительной ТО концентрации А-центров (I), концентрации ТД с уровнем $E_c - 0.15$ эВ (2), изменения концентрации носителей тока при 300 К (3) и величины K_{τ} (4).

I — эксперимент, II — расчет.

лученном материале основным центром рекомбинации является А-центр [8]. Тогда, используя статистику рекомбинации Шокли—Рида, получим следующее выражение для τ :

$$\frac{1}{\tau} = \beta N_A \frac{N_P + N_{TД}}{Q_c \exp(-E_A/kT) + 1}, \quad (1)$$

где β — вероятность захвата дырки на отрицательно заряженный А-центр, N_A — концентрация А-центров, N_P — концентрация фосфора, $N_{TД}$ — концентрация ТД, $Q_c = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — плотность состояний в зоне проводимости Si при 300 К, E_A — энергия активации А-центра. Это выражение справедливо при выполнении условия

$$\ln \left(\frac{\beta}{\gamma} \frac{Q_v}{Q_c} \right) \ll \frac{E_g - E_A - F}{kT} \quad (2)$$

(см., например, [9]), где γ — вероятность захвата электрона на нейтральный А-центр, Q_v — плотность состояний в валентной зоне при 300 К, E_g — ширина запрещенной зоны Si, F — уровень Ферми. В нашем случае $F \approx E_c - 0.3$ эВ, поэтому условие (2) выполнимо при всех разумных значениях β/γ .

Численная подстановка наших условий эксперимента дает результат, приведенный на рис. 3 штриховой линией. Расхождение с экспериментом не превышает 25 %.

Из приведенных выше результатов видно, что ТО *n*-кремния приводит к росту τ вплоть до температуры 700 °С. Причем скорость изменения τ и предельная температура возрастания τ зависят от величины исходного времени жизни. Увеличение τ может являться следствием распада пересыщенного твердого раствора глубоких примесей, относительный вклад в рекомбинацию которых зависит от структурного совершенства кристалла.

Обнаружено, что исследованные режимы ТО не оказывают существенного влияния на генерацию А-центров при последующем γ -облучении. Наблюдаемое

влияние предварительной ТО на константу деградации времени жизни объясняется изменением вклада А-центров в рекомбинацию вследствие изменения положения уровня Ферми при введении термодоноров. Получено удовлетворительное согласие расчета с экспериментом.

Л и т е р а т у р а

- [1] Глинчук К. Д., Литовченко Н. М., Скрыль С. И. Рекомбинационные центры в термообработанном кремнии. — Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., 1985, № 7, с. 58—66.
- [2] Смирнов Л. С. Вопросы радиационной технологии полупроводников. Новосибирск, 1980. 292 с.
- [3] Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 496 с.
- [4] Graff K., Pieper H. — J. Electron. Mater., 1975, v. 4, p. 281—286.
- [5] Weber J. B. — Appl. Phys., 1983, v. A30, N 1, p. 1—22.
- [6] Глинчук К. Д., Литовченко Н. М., Сальник Э. А., Скрыль С. И., Трошин А. Л. Влияние углерода на время жизни неосновных носителей тока в термообработанном кислородосодержащем кремнии. — ФТП, 1985, т. 19, в. 4, с. 770—771.
- [7] Rajot B., Comrain H., Lerouille J., Clerjand B. — Physica, 1983, v. 117B-118B, p. 110.
- [8] Уваров Е. Ф., Чукичев М. В. Исследование радиационных дефектов в промышленном кремнии, облученном электронами с энергией 1 МэВ. — В кн.: Радиационная физика неметаллических кристаллов. Киев, 1974, т. 3, ч. 1, с. 305—312.
- [9] Шаховцов В. И., Ясковец И. И. Рекомбинационные свойства n-Si, облученного γ -квантами или электронами. — Препринт ИФ АН СССР. Киев, 1976. 24 с.

Институт физики АН УССР
Киев

Получена 24.12.1986
Принята к печати 12.04.1987