

06.2; 12

© 1992

ОБ ОСОБЕННОСТИ ОТЖИГА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ
В НЕЙТРОННО-ЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИШ. Махкамов, М. Маманова,
Ю.В. Пахарук, Н.А. Турсунов

Исследованию процесса отжига радиационных дефектов (РД) в кремнии посвящено достаточно большое количество экспериментальных и теоретических работ [1-7]. Сопоставление имеющихся литературных данных позволяет сделать идентичный вывод о том, что термостабильность РД в кремнии можно регулировать, модифицируя исходный кристалл различными способами. В работах [2-5] показано, что температуру отжига РД можно сместить в область низких или высоких температур, в зависимости от совершенства кристалла, от концентрации исходной примеси или содержания кислорода. На термическую стабильность РД могут оказать существенное влияние также параметры бомбардирующих частиц и условия облучения [4, 6, 8].

Анализ температур отжига РД показывает, что однотипные РД (дефекты одинаковой природы) имеют практически близкие значения температуры отжига и не зависят от предыстории и условий облучения, а наблюдаемое смещение температуры отжига, в основном, обусловлено введением новых или более сложных дефектов.

В данной работе впервые экспериментально обнаружено несоответствие температуры отжига одного и того же типа РД в промышленном и нейтронно-легированном кремнии и на основе полученных экспериментальных данных и теоретических оценок объяснен наблюдаемый эффект.

Основные исследования проводились на нейтронно-легированном и промышленном кремнии n -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho \approx 37-42$ Ом·см и временем жизни неосновных носителей заряда τ_p 5 мкс. Концентрация кислорода у обоих типов кристаллов составляла $(3-6) \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Нейтронно-легированный кремний (НЛК) был получен из исходного Si p -типа с $\rho \geq 5000$ Ом·см, который предварительно облучался реакторными нейтронами флюенсом $(6-10) \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ и отжигался при 800 °С в течение 2 ч, что обеспечивало полный отжиг РД, конверсию типа проводимости и выход на номинал промышленного кремния по ρ и τ_p . Для исключения влияния температуры на процесс образования РД аналогичной термообработке подвергался и промышленный кремний. Образцы, изготовленные из указанных кристаллов кремния, облучались нейтронами с энергией $E \geq 0.1$ МэВ флюенсами $10^{12}-5 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ с последующим измерением параметров РД методом емкостной спектроскопии и стационарной фотопроводимости.

Сопоставление спектров *DLTS* и фотопроводимости показывает, что в НЛК и промышленном кремнии при облучении создаются РД практически одинакового типа, однако коэффициент радиационного повреждения ζ_p в НЛК примерно в 2 раза меньше, чем в промышленном кремнии.

Для выявления термостабильности РД проводился изохронный отжиг облученных образцов в интервале температур 150–800 °С.

На рисунке представлено относительное изменение концентрации дивакансии при изохронном отжиге НЛК и промышленного кремния, облученных флюенсами нейтронов $3 \cdot 10^{14}$ см⁻². Из анализа кривых отжига следует, что термический распад РД в НЛК происходит в интервале 425–450 °С (кривая 1), а в промышленном полный отжиг происходит при значительно меньших температурах (325–350 °С), чем в НЛК (кривая 2).

Увеличение эффективной температуры отжига, например дивакансии в НЛК, может быть объяснено следующим образом.

Известно, что при получении НЛК производится отжиг монокристалла в интервале температур 750–850 °С с целью нормализации параметров НЛК. В нашем случае при идентичных условиях отжигался и промышленный кремний. При отжиге нормализация параметров НЛК сопровождается распадом РД, их комплексов на соответствующие компоненты с последующей миграцией их на стоки и разупорядоченные области, а отжиг промышленного кремния при указанных условиях практически не изменяет исходные параметры из-за отсутствия стоков для собственных и неконтролируемых дефектов. Наличие такого различия в процессе нормализации промышленного кремния по сравнению с НЛК может существенно влиять на метастабильность кристалла при последующей терморadiационной обработке.

Рассмотрим N количество радиационных дефектов, диффундирующих к ловушкам. Концентрация дефектов данного сорта в момент времени t подчиняется дифференциальному уравнению [1]

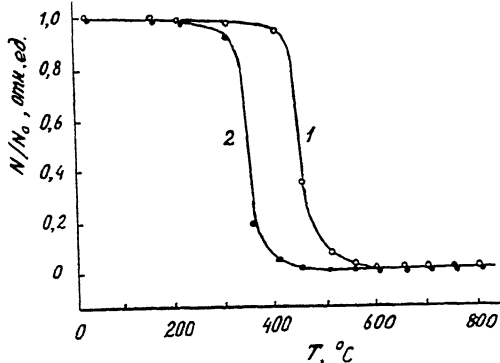
$$-\frac{dN}{dt} = K_0 f(N) \exp(-Q/kT), \quad (1)$$

где K_0 – некоторая постоянная, Q – энергия миграции дефекта, k – постоянная Больцмана.

Ограничившись рассмотрением реакции первого рода, что вполне соответствует отжигу РД на ловушках, и определив температуру отжига дефектов T_0 как температуру, при которой происходит экспоненциальное уменьшение концентрации дефектов, из (1) можно получить эффективное значение T_0 [1]:

$$T_0 \approx \frac{Q}{k \ln(K_0 Q/kb)},$$

где b – скорость изменения температуры.



Изохронный (30 мин) отжиг концентрации дивакансий в облученном нейтронами кремнии. 1 – нейтронно-легированный кремний; 2 – промышленный кремний.

Как известно, при нейтронном легировании в объеме кристалла сформировавшиеся дефекты создают вокруг себя деформационные поля [8], которые изменяют спектр барьеров от $f(Q) = \delta(Q - Q_0)$, характерного для промышленного кремния, до $f(Q)$ с конечной шириной. Это приводит к вероятностному значению радиуса захвата дефекта. Действительно, при $Q > Q_0$ на расстоянии $R < R_0$ (R_0 – радиус захвата ловушкой в промышленном кремнии, $R = R_0 - n\delta$, n – номер координационной сферы от ловушки, δ – половина межатомного расстояния) с конечной вероятностью может оказаться барьер Q_m , такой, что $F(R) < Q_m/\delta$, где $F(R)$ – сила притяжения дефекта к ловушке. При этом дефект не сможет приближаться к ловушке.

Как показывает анализ этого процесса, вероятность того, что дефект в своем движении к ловушке не будет остановлен барьером $Q_m = \frac{e^2 a^2}{\epsilon \delta} \cdot \frac{1}{R}$ (где e – заряд электрона, ϵ – диэлектрическая проницаемость, a – межатомное расстояние), оценивается величиной x_n [9]:

$$x_n = \prod_{j=1}^n \int_0^{Q_j} f(Q) dQ. \quad (2)$$

Выбрав $f(Q)$ в виде ступенчатой функции

$$f(Q) = \begin{cases} 0 & , \quad Q < Q_{min} \\ \frac{1}{Q_{max} - Q_{min}} & , \quad Q_{min} < Q < Q_{max} \\ 0 & , \quad Q > Q_{max} \end{cases}$$

для x_n получим выражение в приближении

$$Q_j \approx \langle Q \rangle - \langle Q_{max} \rangle,$$

$$x_n \approx \left(\frac{\langle Q \rangle - Q_0}{Q_{max} - Q_0} \right)^n = x^n.$$

Таким образом, для температуры отжига дефектов в НЛК с учетом $f(Q)$ имеем

$$T_a \approx T_0 \sum_{n=1}^N x^n \left(1 + \frac{2\delta}{R_0} n \right) = \quad (3)$$

Из (3) для $N < 10$, $R_0 = 20\delta$, $\langle Q \rangle \approx 0.5 Q_{max}$, $\frac{Q_0}{Q_{max}} \approx 0.1-0.2$ получим $T_a \approx 1.3 T_0$. Подставляя значение температуры отжига дивакансии для промышленного кремния $T_0 = 325^\circ\text{C}$ (кривая 2), получим изменение эффективной температуры отжига дивакансии в НЛК $\Delta T = T_a - T_0 \approx 0.3 T_0 \approx 100^\circ\text{C}$, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б у р г у э н Ж., Л а н н о М. Точечные дефекты в полупроводниках. Экспериментальные аспекты. М.: Мир, 1985. 304 с.
- [2] В а в и л о в В.С., Г л а з м а н В.Б., И с а е в Н.У., М у к а ш е в Б.Н., С п и ц ы н А.В. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 3. С. 471-475.
- [3] Н и р а т а М., Н и р а т а М., С а и т о Н. // J. Phys. Soc. Jap. 1969. V. 27. N 2. P. 405-414.
- [4] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л.С. Смирнова. Новосибирск: Наука, 1980. 296 с.
- [5] С h e n g L.J., L o r i J. // Phys. Rev. 1968. V. 171. N 3. P. 856-862.
- [6] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л.С. Смирнова. Новосибирск: Наука, 1977. 256 с.
- [7] Л е н ч е н к о В.М. В кн.: Физико-химические проблемы твердого тела. Красноярск, 1975. С. 3-32.

- [8] Коноплева Р.Ф., Литвинов В.Л., Ухин Н.А.
Особенности радиационного повреждения полупроводников части-
цами высоких энергий. М.: Атомиздат, 1971. 174 с.
- [9] Хабибуллаев П.К., Оксенгендлер Б.Л.,
Пахарукоев Ю.В. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В.
21. С. 1320-1323.

Институт ядерной физики
АН Республики Узбекистан,
Ташкент

Поступило в Редакцию
6 октября 1992 г.