

Влияние рентгеновского облучения на внутреннее трение в кремнии

© Н.П. Кулиш, П.А. Максимюк, Н.А. Мельникова, А.П. Онанко, А.М. Струтинский

Киевский государственный университет имени Т. Шевченко,
252022 Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 9 декабря 1997 г.)

Изучалось влияние γ -облучения на температурные зависимости внутреннего трения в дискообразных подложках кремния в килгерцевом диапазоне частот. После облучения дозами 10^4 и 10^5 R обнаружены два доминирующих максимума внутреннего трения при ~ 330 и ~ 450 К с энергией активации $H_1 = 0.6$ eV и $H_2 = 0.9$ eV соответственно, обусловленные, по-видимому, переориентацией междоузельных атомов кремния в гантельных конфигурациях.

Ввиду хрупкости подложек кремния, применяемых при изготовлении интегральных схем, измерение их упругих и неупругих характеристик статическими методами, требующими значительных величин деформации невозможно. Неразрушающий метод внутреннего трения (ВТ) позволяет устранить эти недостатки и устанавливать спектр радиационных дефектов: располагая их по временам релаксации и по вкладу в затухание упругих колебаний. В настоящей работе исследовались температурные зависимости ВТ в дискообразных подложках кремния до и после γ -облучения.

Для измерения температурных зависимостей ВТ и модуля упругости использовался метод изгибных резонансных колебаний подложки на частоте ~ 1 kHz при знакопеременной деформации $\sim 10^{-6}$ в вакууме $\sim 10^3$ Pa [1]. Измерения температурных зависимостей ВТ производились на шести идентичных, прошедших один и тот же технологический маршрут, подложках кремния ориентации (100) *p*-типа, легированного бором, с удельным электросопротивлением $\sim 7.5 \Omega \cdot \text{cm}$ диаметром 76 mm, толщиной 460–470 μm после нанесения слоя оксида кремния $\sim 0.6 \mu\text{m}$ в результате высокотемпературного окисления в сухом кислороде при ~ 1300 К.

В процессе измерений было установлено, что отжиг структурных дефектов кремния искажает форму температурного спектра ВТ. Пики ВТ, создаваемые точечными дефектами, можно было наблюдать при условии, что подложка нагревалась со скоростью ~ 0.1 K/s.

На рисунке представлены температурные зависимости ВТ образца до и после γ -облучения. Высокий начальный фон ВТ и значительная высота имеющихся максимумов при первом нагреве до облучения по сравнению с фоном и величинами пиков кривой температурного спектра ВТ при повторном нагреве свидетельствуют о наличии больших полей термоупругих напряжений в подложке кремния, возникших в результате технологической операции высокотемпературного окисления.

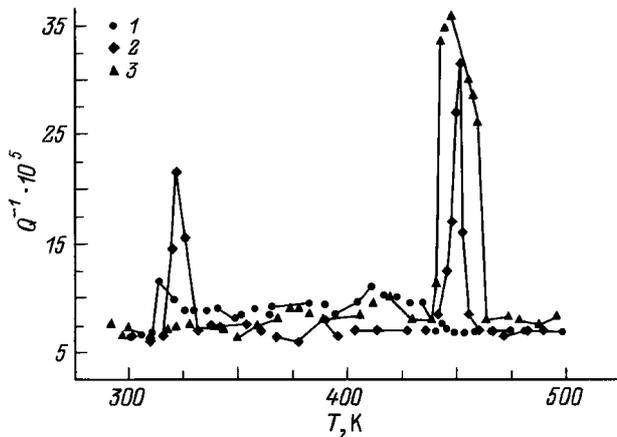
Отметим, что температурная зависимость модуля упругости обнаруживает линейный непрерывный спад (в пределах погрешности эксперимента) с ростом температуры до температурного положения максимумов. В области максимума ВТ тангенс угла наклона кривой зависимости модуля упругости заметно увеличивается, наблюдается релаксация модуля упругости.

После рентгеновского облучения дозой 10^4 R максимум ВТ при ~ 330 К, представленный на рисунке кривой 2, резко возрастает, его высота увеличивается почти в 3 раза при уменьшении вдвое ширины, что свидетельствует о происходящем процессе релаксации одного типа радиационных дефектов. Из рисунка также видно, что после облучения дозой 10^5 R высота максимума при 330 К по сравнению со спектром ВТ до облучения существенно не изменилась, что свидетельствует об особом влиянии дозы 10^5 R. При увеличении дозы облучения до $5 \cdot 10^5$ R наблюдалось увеличение высоты этого же пика почти в 6 раз.

Вторым еще более высоким, доминирующим в измеряемом температурном интервале после рентгеновского облучения дозой 10^4 R стал узкий максимум ВТ при ~ 450 К. Для пиков ВТ при ~ 330 и ~ 450 К были получены значения энергий активации, соответственно равные $H_1 = 0.63 \pm 0.1$ eV и $H_2 = 0.88 \pm 0.1$ eV. Близость полученных нами величин энергий активации при 320 и 450 К соответственно к энергии миграции для положительно заряженных междоузельных атомов Si_i^+ $H_0 = 0.85$ eV [2] позволяет предположить релаксационный механизм, обусловленный переориентацией междоузельных атомов кремния. При увеличении дозы облучения от 10^4 до 10^5 R высота максимума при ~ 450 К возросла. Зависимость высоты максимума от дозы облучения свидетельствует о релаксационном процессе переориентации комплексов радиационных дефектов.

Под действием знакопеременного напряжения релаксацию комплексов радиационных дефектов можно объяснить следующим образом. При γ -облучении в результате столкновения электронов, образующихся при комптоновском рассеянии, с атомами кремния происходит образование дефектов по Френкелю. Оценки показывают, что энергии образующихся комптоновских электронов, равной ~ 1 MeV, что соответствует данному эксперименту, достаточно для смещения атомов кремния из своих равновесных положений [2].

С учетом перенасыщения междоузельными атомами термически окисленного кремния вследствие облучения максимум при ~ 330 К объясняется релаксационным процессом переориентации положительно заряженных междоузельных атомов кремния Si_i^+ в гантельных конфигурациях, а максимум при ~ 450 К связан с процес-



Температурные зависимости внутреннего трения в дискообразной подложке кремния, легированного бором, со слоем диоксида кремния. 1 — до облучения, 2 — после облучения дозой 10^4 R, 3 — 10^5 R.

сом переориентации нейтральных междоузельных атомов кремния Si_i^0 .

Поскольку исследуемый кремний легирован бором переориентация междоузельных атомов бора начинается термически активируемым перескоком меньшего по радиусу атома бора на половину гантели. Оторвавшийся междоузельный атом кремния перескакивает дальше и образует нейтральную гантель Si_i-Si_i , слившись с соседним, правильно расположенным атомом кремния.

Указанный распад междоузельных атомов бора приводит к образованию анизотропных нейтральных междоузельных комплексов кремния в кремнии Si_i^0 , расщепленных в направлении [100], релаксационный процесс переориентации этих комплексов, по-видимому, вызывает рост доминирующего максимума ВТ при ~ 450 К с уменьшением высот пиков, проявляющихся при более низких температурах и связанных с междоузельными атомами бора.

Наиболее прочной является пара Si_i^0 с двумя ковалентными связями, соответствующая пику ВТ при ~ 450 К. Наименее связана положительно заряженная пара междоузельных атомов Si_i^+ , соответствующая максимуму при ~ 330 К. Дело в том, что по сравнению с имеющим также одну ковалентную связь нейтральным междоузельным комплексом бора в паре Si_i^+ кулоновское взаимодействие, связанное с распределением отрицательного заряда, составляет только 7% от энергии ковалентной связи, а в междоузельном комплексе бора кулоновское взаимодействие сильнее и эквивалентно 80% ковалентной связи [3,4].

Свойства междоузельных атомов в кремнии зависят от их геометрической конфигурации и зарядового состояния. Поскольку при равновесных условиях зарядовое состояние междоузельных атомов в кремнии зависит от положения уровня Ферми, на величину энергии миграции влияют легирование примесями и наличие других структурных дефектов. Неравновесные условия, которые создаются при рентгеновском облучении, также

влияют на зарядовое состояние междоузельных атомов, а следовательно, и на энергию активации термически активируемой диффузии. Повторяющаяся смена зарядового состояния междоузельных атомов Si_i во время γ -облучения приводит к броуновскому движению этих дефектов. Радиационно-усиленная диффузия при облучении происходит прямым смещением ранее образованных междоузельных атомов падающими электронами.

Таким образом, измерение фона ВТ до и после γ -облучения и различных термообработок дает информацию о наличии и об изменениях полей термоупругих напряжений в подложках кремния. Увеличение высот максимумов ВТ после γ -облучения различными дозами свидетельствует о росте концентрации радиационных дефектов, а уширение максимумов при этом отражает происходящий процесс релаксации дополнительно возникших новых типов радиационных дефектов.

Список литературы

- [1] П.А. Максимюк, А.В. Фомин, В.А. Глей, А.П. Онанко, Р.И. Дячук, М.Ю. Кравецкий. ФТТ **30**, 9, 2868 (1988).
- [2] Л.С. Смирнов. Физические процессы в облученных полупроводниках. Наука, Новосибирск (1977). 255 с.
- [3] С.П. Никаноров, Б.К. Кардашев. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. Наука, М. (1985). 253 с.
- [4] Л.Н. Александров, М.И. Зотов. Внутреннее трение и дефекты в полупроводниках. Наука, Новосибирск (1979). 158 с.