

Общество "Знание" РСФСР

Московский Дом научно-технической пропаганды
имени Ф.Э. Дзержинского

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И
ПРИБОРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

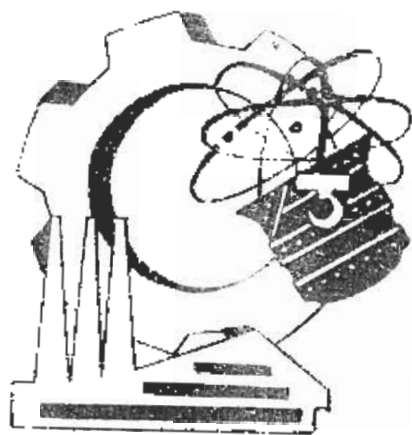
Материалы семинара

Москва, 1988 г.

Общество "Знание" РСФСР

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ПРИВОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

МДНТП
им. Ф. Э. ДЗЕРЖИНСКОГО



1988

А.Л.ОЧЕРЕТАНСКИЙ, В.М.СТУЧЕБНИКОВ

ВЛИЯНИЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЕНЗОЭФФЕКТ В p-KHC

Быстрое развитие атомной энергетики определяет растущий интерес к свойствам материалов, используемых в приборах, работающих в условиях реакторного облучения. К таким материалам относятся сильнолегированные структуры КНС р-типа проводимости, успешно используемые для чувствительных элементов общепромышленных датчиков теплоэнергетических параметров [1]. Как показано в литературе [2, 3], сильнолегированный р-КНС обладает высокой радиационной стойкостью по отношению к γ - и к n - облучению. Вместе с тем детальные исследования влияния реакторного облучения на тензорезистивный эффект в структурах р-КНС, важные с практической точки зрения, до сих пор отсутствуют.

В настоящей работе приведены результаты таких исследований, выполненных на специальных тестовых образцах балочного типа по методике, описанной в литературе [4]. Балочные образцы изготавливались из структур р-КНС ($\rho = 1 \cdot 10^{-3} \sim 4 \cdot 10^{-2}$ Ом·см) с ориентацией $(10\bar{1}2)_{\text{Al}_2\text{O}_3} // (001)_{\text{Si}}$. Продольные и поперечные к рсз балки тензорезисторы Al_2O_3 располагались вдоль кристаллографических направлений $\langle 110 \rangle$. Экспериментально определялись значения коэффициентов чувствительности тензорезисторов

$$K_{1,2} = \frac{\Delta R_{1,2}}{R_{1,2}^0 \epsilon}, \quad (1)$$

где ΔR - изменение сопротивления тензорезистора под действием деформации; R^0 - сопротивление недеформированного тензорезистора; ϵ - продольная деформация поверхности балки, а индексы 1 и 2 относятся к продольным и поперечным относительно осей балки тензорезис-

торам. Учитывается связь коэффициентов $K_{1,2}$ с коэффициентами эластосопротивления m_{II} , m_{I2} , m_{44} кремния [4]. Из данных измерений рассчитывались величины

$$m_{44} \approx \frac{K_1 - K_2}{2(1 - \nu_c)} \quad \text{и} \quad (2)$$

$$M = \frac{K_1 + K_2}{(1 - \nu_c)}, \quad (3)$$

где ν_c - коэффициент Пуассона сапфира [5], а величина M является линейной комбинацией коэффициентов m_{II} и m_{I2} :

$$M = m_{II} + (1 - 2\nu_k) m_{I2} \quad (4)$$

и используется при расчетах чувствительности интегральных тензопреобразователей на основе структур КНС [6] ($\nu_k = \frac{c_{12}}{c_{11}}$ - отношение упругих констант кремния).

Исследуемые образцы облучались в реакторе с интенсивностью нейтронного потока $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и сопутствующего γ -облучения в несколько сотен р/с. Температура образцов при облучении не превышала 70°C ; тепловые нейтроны отсекались кадмиевым чехлом. Облучение проводилось ступенчато до определенного флюенса Φ_0 в диапазоне от $7 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. После каждого этапа облучения проводились измерения параметров K_1 и K_2 при температурах 77, 300 и 370 К.

На рис. 1 приведены экспериментальные дозовые зависимости относительного изменения коэффициентов чувствительности продольного (K_1) и поперечного (K_2) тензорезисторов для структур р-КНС с различным уровнем легирования, снятые при комнатной температуре. Видно, что вплоть до флюенса $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ характер изменения продольного (рис. 1а) и поперечного (рис. 1б) коэффициентов чувствительности одинаков для всех образцов с $\rho_0 > 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$: уменьшение по абсолютной величине тем больше, чем слабее легирован исходный слой кремния. Зависимость $K_2(\Phi)$ более сильная, чем $K_1(\Phi)$. Для структуры КНС с $\rho_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ коэффициенты чувствительности не меняются в пределах точности измерений ($\sim 1\%$).

При облучении большими флюенсами (до 10^{17} см^{-2}) характеры зависимостей $K_1(\Phi)$ и $K_2(\Phi)$ существенно различаются. Поперечные коэффициенты чувствительности продолжают уменьшаться по абсолютной величине и при некотором флюенсе (зависящем от степени легирования) меняют знак. Продольные коэффициенты (по крайней мере, при некоторых уровнях легирования), пройдя через минимум, начинают расти, так что при $\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $\rho_0 = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ продольный

коэффициент тензочувствительности в 1,5 раза превышает исходное значение.

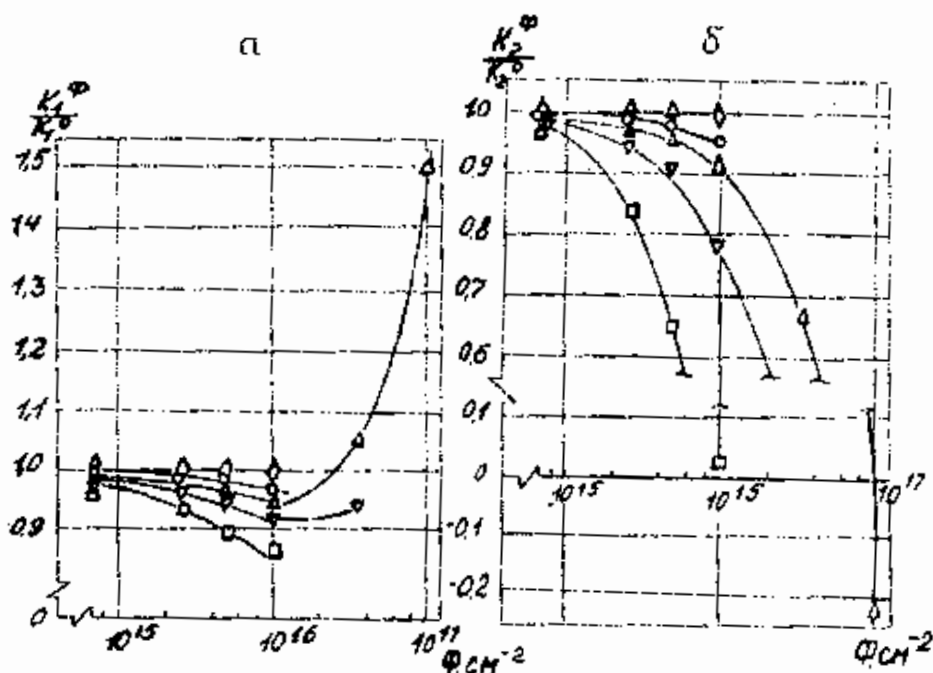


Рис. 1. Зависимости относительного изменения коэффициентов тензочувствительности продольного (а) и поперечного (б) тензорезисторов от флюенса нейтронов.

Удельное сопротивление слоя КНС, 10^{-3} Ом·см:

0,001 (\diamond), 0,0026 (\circ), 0,0056 (\triangle), 0,008 (∇), 0,04 (\square)

Списанные экспериментальные зависимости $K_1(\Phi)$ и $K_2(\Phi)$ зависят от температуры, при которой проводятся измерения. Так, при температуре жидкого азота ($T = 77$ К) вплоть до флюенса $4 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ для всех исследованных образцов с $\rho_0 > 2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см сохраняется монотонный характер зависимостей. Напротив, при $T = 370$ К рост величины $K_1(\Phi)$ при $\Phi > 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ выражен сильнее, так что

при $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ величина $\frac{K_1(\Phi)}{K_1(0)}$ для образца с $\rho_0 = 5,6 \cdot 10^{-3}$ Ом·см составляет 1,8.

На рис. 2 показаны дозовые зависимости коэффициентов эластосопротивления m_{44} и M , рассчитанных по выражениям (2) и (3) в предположения, что упругие характеристики сапфира слабо зависят от облучения [7]. Как видно из рис. 2а, при комнатной температуре коэффициент монотонно уменьшается с ростом флюенса облучения, причем величина изменения тем больше, чем выше исходное удельное сопротивление слоя кремния. При температуре жидкого азота вид зависимостей $m_{44}(\Phi)$ сохраняется, хотя изменения становятся более заметными.

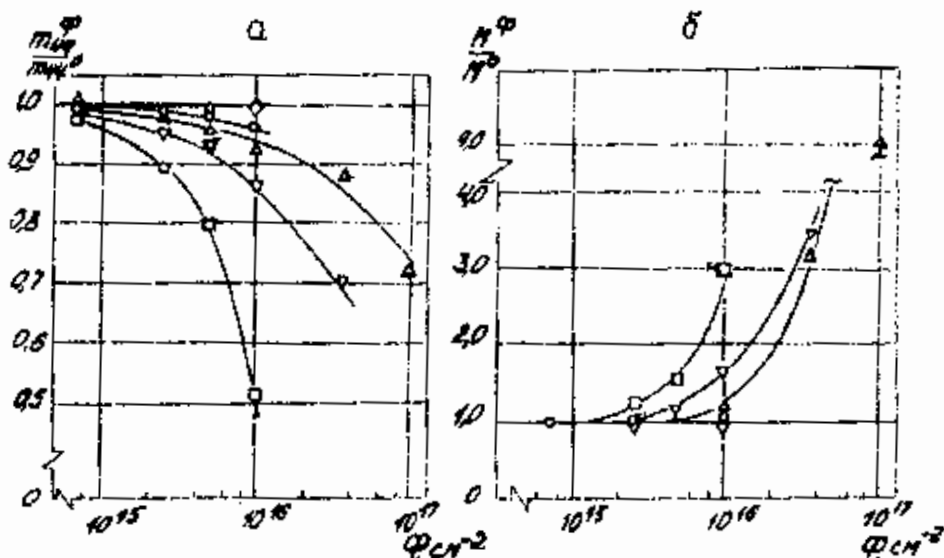


Рис.2. Зависимости относительного изменения коэффициента продольного сопротивления ρ_{44} (а) и коэффициента M (б) от флюенса нейтронов.

Удельное сопротивление слоя КНС, 10^{-3} Ом·см:

0,001 (\diamond), 0,0026 (\circ), 0,0056 (Δ), 0,008 (∇), 0,04 (\square)

При $T = 370$ К у образца с $\rho_0 = 5,6 \cdot 10^{-3}$ Ом·см наблюдается увеличение коэффициента ρ_{44} при $\Phi > 4 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$. У образца с $\rho_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ Ом·см при всех исследованных температурах величина ρ_{44} не менялась в пределах погрешности измерений.

Более сложный характер имеет дозовое изменение величины M в зависимости от степени легирования кремния и температуры. На рис.2б показаны дозовые зависимости относительного изменения коэффициента M , полученные при комнатной температуре. Обращает на себя внимание резкое увеличение M с ростом флюенса при малых уровнях легирования. Примерно такой же вид имеют зависимости $M(\Phi)$ и при $T = 370$ К. Однако при температуре жидкого азота изменение коэффициента M значительно меньше по величине и уменьшается с повышением уровня легирования, так что при $\rho_0 = 4 \cdot 10^{-2}$ Ом·см изменение M практически отсутствует вплоть до флюенса $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$.

Такая сложная зависимость коэффициентов ρ_{44} и M от флюенса нейтронов, температуры и степени легирования, по-видимому, связана с изменением зонной структуры и механизмов рассеяния дырок в кремнии при облучении, хотя количественный анализ затруднен отсутствием математической теории тензоэффекта в условиях сложной (и деформированной термическими напряжениями) зонной структуры p-кремния, наличия вырождения носителей и дополнительных искажений зонной структуры, вызванных облучением.

Из изложенных результатов можно заключить, что в р-КНС с исходной концентрацией дырок $p_0 \geq 1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ($\rho_0 \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) тензoeffект не зависит от облучения по крайней мере до $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. При меньшем уровне легирования относительное изменение коэффициента эластосопротивления m_{44} с облучением значительно меньше, чем M (особенно в области комнатной температуры). Поэтому при проектировании радиационно-стойких тензопреобразователей предпочтение следует отдавать таким типам, в которых коэффициент тензочувствительности не зависит от M , а определяется лишь величиной m_{44} [6].

Л и т е р а т у р а

1. Стучебников В.М. Тензорезисторные преобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире". - Измерения, контроль, автоматизация, 1982, № 4, с.15-26.
2. Коба Б.В., Литвинов В.Л., Очеретянский А.Л. и др. Влияние реакторного облучения на электрофизические характеристики гетероэпитаксиальных слоев кремния р-типа на сапфире. - Атомная энергия, 1985, т.59, № 1, с.58-59.
3. Анашин А.М., Очеретянский А.Л., Стучебников В.М., Хасиков В.В. Влияние γ -облучения на тензопреобразователи давления на основе структур КНС. - В сб.: Датчики на основе технологии микроэлектроники. - М.: МЭИТП им.Ф.Э.Дзержинского, 1986, с.70-74.
4. Стучебников В.М., Суханов В.И., Хасиков В.В. Коэффициенты эластосопротивления в р-КНС. - Приборы и системы управления, 1983 № 12, с.32-33.
5. Стучебников В.М. Анизотропия модуля Юнга и коэффициента Пуассона на сапфире. - Приборы и системы управления, 1983, № 6, с.40-41.
6. Лурье Г.И. Исследование тензoeffекта в структурах КНС р-типа проводимости в интервале температур (4-300) К. - В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования в области создания новых измерительных преобразователей и вопросы автоматизированного проектирования. - М.: НИИТеплоприбор, 1985, с.17-31.
7. Кроуфорд, Уиттекс. Устойчивость неметаллов и керамических материалов к воздействию облучения. - В кн.: Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. Избранные доклады иностранных ученых. - М.: Атомиздат, 1959, т.8, с.435-453.