

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕННЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ МОП-СТРУКТУР

Богатырев Ю.В.

ГНУ Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси,
220072, Минск, ул. П.Бровки, 17

Восстановление характеристик облученных МОП-приборов с помощью различных видов отжига [1, 2] представляет практический и научный интерес для обеспечения работоспособности интегральных микросхем на комплементарных МОП-транзисторах (КМОП ИМС) в условиях воздействия ионизирующих излучений. Увеличение температуры кристаллов МОП-транзисторов до 423-473 К вследствие повышения тока стока или применения специального нагревателя позволяет восстанавливать параметры МОП-приборов с помощью отжига в процессе облучения [3, 4].

В данной работе рассматривается метод восстановления параметров облученных транзисторных МОП-структур в составе КМОП ИМС с помощью кратковременного отжига переменным током, а также происходящие при этом физические процессы.

В качестве объектов исследований использовались транзисторные МОП-структуры в составе КМОП ИМС, выполненные по стандартной планарной технологии.

Облучение образцов проводилось на гамма-установке «Исследователь» гамма-квантами Co^{60} (мощность дозы 2 Гр/с).

В основе метода токового отжига используется эффект защелкивания в паразитных р-п-р-п-структурах, образующихся в КМОП ИМС на объемном кремнии [3]. Известно [5, 6], что активизация паразитной р-п-р-п-структуры зависит от топологических размеров и электрического режима работы КМОП ИС. В частности, возникновение эффекта защелкивания определяется размерами и формой различных полупроводниковых областей в ИМС, а также величиной напряжения питания и потенциалами на других выводах схемы.

Процесс токового отжига осуществляется путем подачи переменного напряжения частотой $f=50$ Гц - 200 кГц на выводы питания микросхем в течение $t = 20-60$ с. Под действием быстрого изменения напряжения происходит переход паразитных р-п-р-п-структур в низкоимпедансное состояние, т.е. отпирание обратносмещенных р-п-переходов (сток-подложка, исток-подложка и защитных диодов) и инжекция неосновных носителей в структуру из внешних цепей. При этом осуществляется разогрев р-п-переходов и прилегающих к ним областей кристалла МОП-структур до температур порядка 473-503 К. Эффективный отжиг радиационно-индуцированных зарядов в объеме подзатворного оксида и на границе раздела Si-SiO₂ происходит за счет комплексного теплового и инжекционного воздействия переменного тока, протекающего через структуру приборов. Колебательное движение свободных носителей увеличивает вероятность нейтрализации центров захвата в диэлектрике и на границе раздела диэлектрик-полупроводник [1]. Свободные носители передают энергию решетке кристалла и особенно дефектным центрам с нарушенными связями, вызывая возрастание колебаний решетки и образование в ней локальных смещений. В результате решетка стремится занять состояние с минимальной энергией, что является структурой с более упорядоченными связями.

Для достаточного восстановления параметров облученных транзисторных МОП-структур при токовом отжиге необходимо обеспечить определенное значение удельной рассеиваемой мощности P_s в одном базовом элементе. Величина P_s зависит от схемотехники, топологии и степени интеграции ИМС.

Максимальное значение рассеиваемой мощности также ограничивается критической температурой теплового пробоя тиристорной структуры T_{cr} , определяемой эмпирической формулой [4]:

$$T_{cr} = 6400 / (10,43 + \lg \rho),$$

где ρ - удельное сопротивление материала подложки. Для исследованных структур $T_{cr} = 560-580$ К.

В наших условиях разогрев полупроводникового кристалла определялся путем контроля температуры корпуса структур, учитывая поправочные коэффициенты, зависящие от конструктивных особенностей конкретных приборов.

Использование определенных режимов подачи переменного напряжения на выводы питания инверторов в КМОП ИМС позволило активизировать в них паразитную р-п-р-п-структуру в диапазоне частот 50 Гц-200 кГц (рис. 1). Установлено, что с ростом частоты переменного тока снижается напряжение включения структуры.

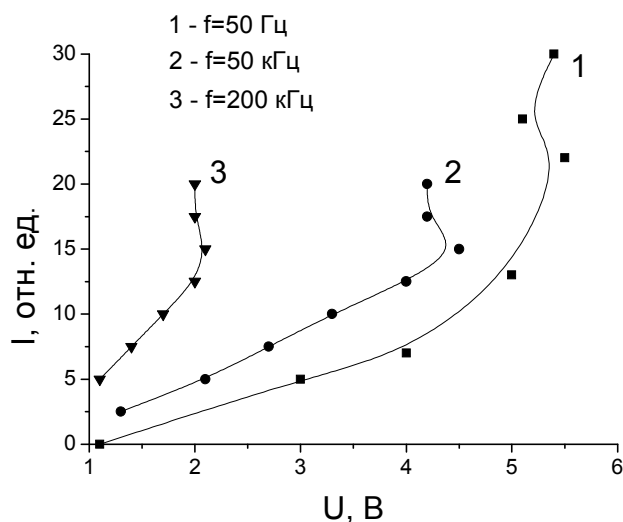


Рис. 1. Вольтамперные характеристики паразитной р-п-р-п-структуры на переменном токе различной частоты.

На рис. 2 показано типичное изменение стокзатворных вольтамперных характеристик р-канальных МОП-транзисторов в инверторах КМОП ИМС под действием гамма-излучения дозой $5 \cdot 10^4$ Гр и после токового отжига ($f=50$ Гц, $I=500$ мА, $t=40$ с). Как видно, после облучения характеристики транзисторов заметно деградируют, а после токового отжига восстанавливаются. При этом не достигается полное восстановление характеристик, поскольку использовался неопределенный режим токового отжига.

В таблице показано влияние гамма-излучения и последующего токового отжига ($f=50$ Гц, $I=500$ мА, $t=60$ с) на пороговые напряжения МОП-транзисторов в составе КМОП ИМС. Измерялись параметры трех образцов ИМС (по 6 инверторов в каждом образце) при облучении и отжиге, а также одного контрольного необлученного образца № 4. Показаны диапазоны значений параметров для 18 инверторов образцов № 1, 2, 3 и шести инверторов образца № 4. Кроме того, в таблице представлены результаты контроля параметров после заключительного термического отжига при температуре 358 К в течение 24 часов. Термический отжиг проводился для предварительной проверки надежности образцов ИМС после токового отжига.

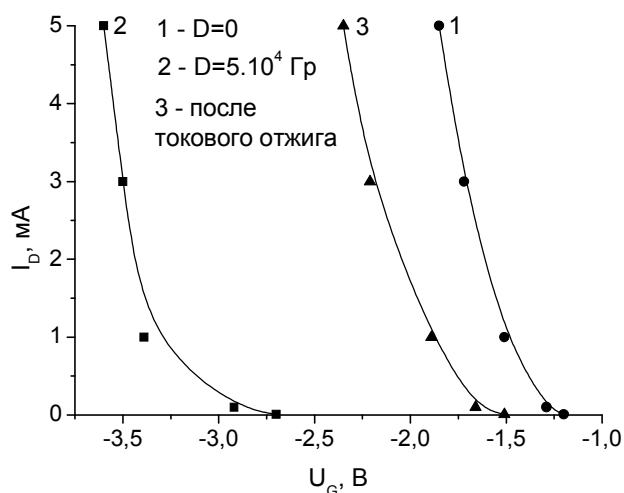


Рис. 2. Влияние гамма-излучения и токового отжига на стокзатворные вольтамперные характеристики р-канальных МОП-транзисторов.

Изменения параметров МОП-транзисторов в составе КМОП ИМС после гамма-облучения, токового отжига (Ток.О) и термического отжига (Тер.О)

Режим воздействия	U_{th} , В		U_{tp} , В	
	№ 1,2,3	№ 4	№ 1,2,3	№ 4
Исходный	0,51-0,95	0,84-0,97	-(1,07-1,20)	-(1,18-1,23)
$D_\gamma=10^4$ Гр	1,39-1,41	-	-(1,74-1,80)	-
$D_\gamma=5 \cdot 10^4$ Гр	1,44-1,89	-	-(1,84-2,70)	-
Ток.О	0,77-1,05	-	-(1,51-1,89)	-
Тер.О	0,96-1,07	0,90-0,95	-(1,52-1,70)	-(1,17-1,20)

Полученные данные показывают, что после токового отжига параметры облученных р-канальных МОП-транзисторов восстановились в меньшей степени. Это можно объяснить тем, что использовался неопределенный режим токового отжига, а также конструктивно-технологическими особенностями структуры МОП-транзисторов. Заключительный термический отжиг в течение 24 часов не выявил снижения надежности КМОП ИМС после радиационного и токового воздействия.

Таким образом, рассмотрены физические процессы, происходящие при токовом отжиге облученных транзисторных МОП-структур в составе КМОП логических элементов вследствие включения паразитных р-п-р-структур под действием переменного напряжения. Установлено, что обеспечение работоспособности КМОП ИМС в условиях облучения достигается в результате проведения кратковременных циклов отжига переменным током частотой 50 Гц - 200 кГц.

Литература

1. Ma T.P., Chin M.R. J. Appl. Phys. **51**, 5458 (1980).
2. Saigne F., Dusseau L., Fesquet J. et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. **48**, 2170 (2001).
3. Troutman R.R. Latch-up in CMOS Technology. The Problem and it's Cure. Boston, Kluwer Academic Publishers. 243 p. (1986).
4. Агаханян Т.М. Основы транзисторной электроники. М., Энергия. 255 с. (1974).
5. Pease R.L., Johnston A.H., Azarewicz J.L. Proc. IEEE. **76**, 1510 (1988).
6. O'Donnell H.B., Loman J.M., Ritter P., Stahlman J.R. IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-33**, 1359 (1986).