

Д.И. БРИНКЕВИЧ, В.С. ПРОСОЛОВИЧ, Ю.Н. ЯНКОВСКИЙ

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННЫЕ ГЕРМАНИЕМ И ЛЮТЕЦИЕМ

The possibility of the use of Lu and Ge doped silicon in the base MOS-technology were studied. Doping by these impurities decreased the quantity of leakage current and increased the breakdown voltage of $p-n$ -junctions and Si-SiO₂-polySi structures. It is shown that Ge and Lu doping of the epitaxial layers allows to improve the stability of $p-n$ -junctions and MOS-structures to the radiation effects.

Один из методов повышения устойчивости полупроводниковых материалов и приборов к воздействию радиации заключается в создании в объеме монокристалла центров аннигиляции (стоков) для компонентов пар Френкеля. Наиболее перспективно в этом аспекте легирование кремния редкоземельными или изовалентными примесями, не проявляющими непосредственно после выращивания электрической активности [1, 2].

В настоящей работе исследовались возможности использования в базовой КМОП-технологии кремния, легированного германием и редкоземельным элементом (РЗЭ) Lu. Указанные примеси вводились в монокристаллы как в процессе выращивания из расплава по методу Чохральского, так и в эпитаксиальные слои (ЭС) в процессе низкотемпературной хлоридной эпитаксии в системе $H_2+SiCl_4+GeCl_4+LuCl_3$. Концентрации германия (N_{Ge}) и лютеция (N_{Lu}), измеренные нейтронно-активационным анализом, составляли $(0,1-2,0) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $5,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно. На полученных эпитаксиальных слоях формировались $p-n$ -переходы и МОП-структуры.

Результаты исследований влияния Lu и Ge на дефектность $p-n$ -переходов и подзатворного диэлектрика представлены на рис. 1, 2. Плотность дефектов (D) определялась из выражения

$$D(U) = \frac{\ln P}{S},$$

где S – площадь структуры, P – вероятность того, что структура не пробивается при приложении к ней напряжения U .

Полученные экспериментальные результаты указывают на то, что дефектность эпитаксиальных пленок,

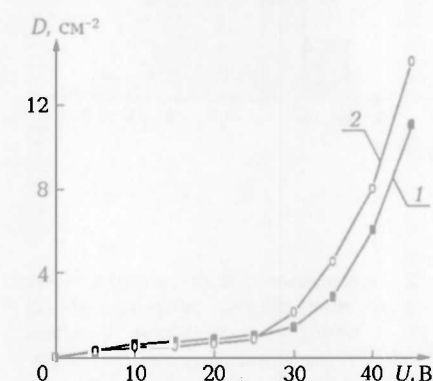


Рис. 1. Зависимость дефектности (D) подзатворного диэлектрика от приложенного напряжения для МОП-структур, изготовленных на подложках КЭФ4,5 (1) и Si:Lu (2)

сформированных на подложках, легированных германием, существенно не отличается от дефектности монокристаллов. Легирование ЭС изовалентной примесью также позволяет снизить величину токов утечки почти до значений, соответствующих $p-n$ -переходам, сформированным на исходных подложках без эпислоя. Оптимальные параметры были получены на эпитаксиальных структурах с концентрацией германия $\sim 5,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 2). Увеличение N_{Ge} до значений, близких к $1,0 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, приводило к возрастанию дефектности.

Полученные результаты можно объяснить с учетом того, что основной легирующей примесью в подложках являлась сурьма в концентрации

$6,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Ковалентный радиус атома германия, так же как и сурьмы, больше, чем у кремния. Поэтому легирование ЭС Ge позволяет уменьшить степень несоответствия параметров решеток подложки и эпитаксиального слоя. Это, в свою очередь, приводит к снижению плотности дислокаций несоответствия и уменьшению напряжений на границе раздела подложка – эпитаксиальный слой. Оптимальное согласование решеток достигается при $N_{\text{Ge}} \sim 5,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Легирование германием в более высоких концентрациях приводит к увеличению периода решетки ЭС по сравнению с подложкой, что вновь вызывает формирование дислокаций несоответствия.

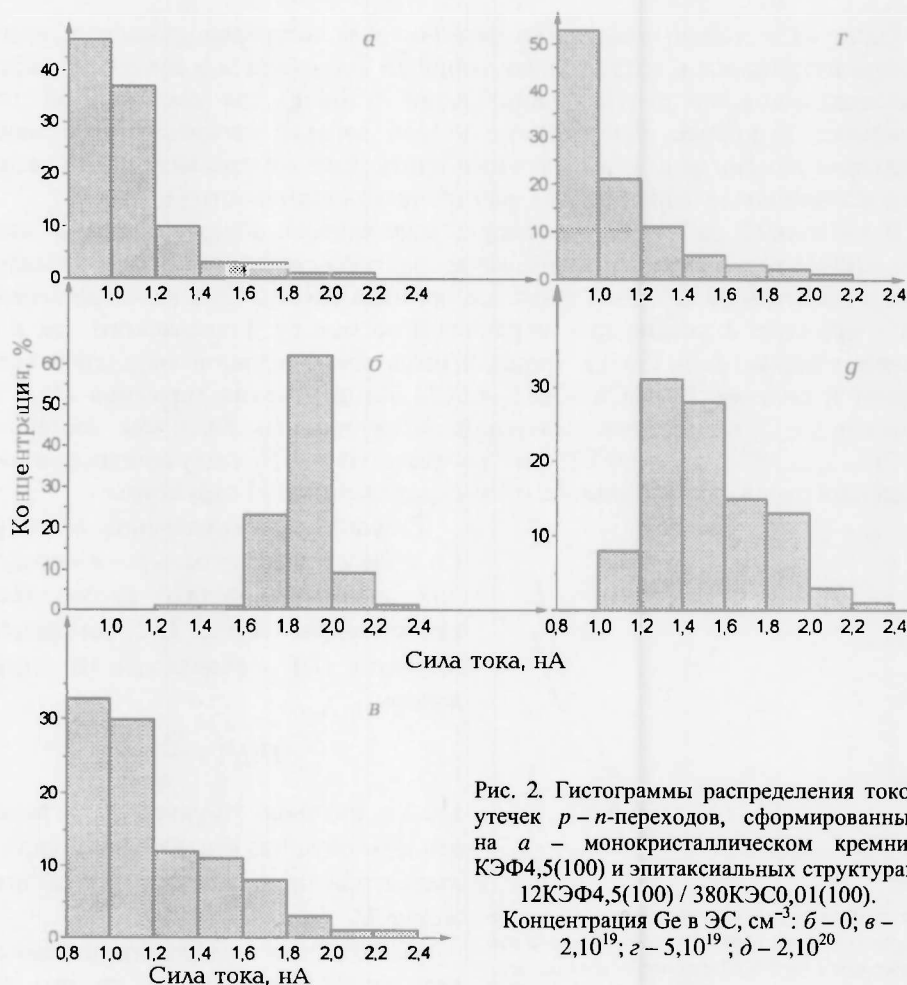


Рис. 2. Гистограммы распределения токов утечек $p-n$ -переходов, сформированных на а – монокристаллическом кремнии КЭФ4,5(100) и эпитаксиальных структурах 12КЭФ4,5(100) / 380КЭС0,01(100). Концентрация Ge в ЭС, см^{-3} : б – 0; в – $2,10^{19}$; г – $5,10^{19}$; д – $2,10^{20}$

Наличие примесей Ge и Lu в подложке не оказывает существенного влияния на характеристики МОП-структур, в том числе и на дефектность подзатворного диэлектрика. Следут, однако, отметить, что структуры, сформированные на основе Si:Lu, имели более низкие значения порогового напряжения, напряжения плоских зон, емкости плоских зон, плотности поверхностных состояний на границе Si – SiO_2 и эффективной концентрации примесей в подложке.

Влияние примесей лютеция и германия на процессы генерации радиационных дефектов в МОП-структурах исследовалось в процессе облучения гамма-квантами ^{60}Co . Из таблицы видно, что эффективность радиационных изменений МОП-структур снижается с уменьшением толщины пленки ди-

оксида кремния. Однако следует отметить, что тонкие, порядка 20 нм, окислы обладают повышенной проводимостью и заряд, наводимый радиацией в SiO_2 , не накапливается, а стекает в кремний. Сравнение образцов с одинаковыми технологиями получения и толщиной диоксида, например 3 и 7, 6 и 8, показывает большую устойчивость структур, легированных РЗЭ, к воздействию радиации. Так, изменения напряжения плоских зон и порогового напряжения при облучении МОП-структур, созданных на Si:Lu , были примерно в два раза меньше, чем для аналогичных контрольных образцов (см. таблицу).

Чувствительность МОП-структур к γ -облучению

Образец	Наличие РЗЭ	Тип окисла	Толщина SiO_2 , нм	U_{th} , В	U_{th} , В при $D_n=10^6$ рад	$\Delta U_{th}'$, В
1	–	O_2+HCl	22,0	–1,35	–2,20	0,85
2	–	O_2+HCl	29,0	–1,60	–2,50	0,90
3	–	O_2+HCl	42,0	–1,90	–3,90	2,00
4	–	$\text{O}_2+\text{H}_2+\text{HCl}$	20,0	–1,50	–2,10	0,60
5	–	$\text{O}_2+\text{H}_2+\text{HCl}$	40,0	–1,40	–3,50	2,10
6	+	$\text{O}_2+\text{H}_2+\text{HCl}$	20,0	–1,00	–1,40	0,40
7	+	$\text{O}_2+\text{H}_2+\text{HCl}$	38,0	–1,75	–2,10	0,35
8	+	O_2+HCl	40,0	–1,20	–1,60	0,40

Таким образом, использование пластин кремния, легированных Ge и Lu, в качестве подложек для эпитаксиальных слоев позволяет повысить устойчивость $p-n$ -переходов и МОП-структур к воздействию радиации. Указанный эффект обусловлен, вероятно, действием примесей редкоземельных элементов и германия как стоков для компонентов пар Френкеля, генерируемых высокоэнергетичными излучениями, а также как центров их аннигиляции.

1. Бочкарев Э.П., Гришин В.П., Карпов Ю.А., Марунина Н.И. Свойства легированных полупроводников. М., 1977. С. 88.

2. Петров В.В., Просолович В.С., Ткачев В.Д. и др. // ФТП. 1985. Т. 19. № 4. С. 767.

Поступила в редакцию 13.11.2001.

Дмитрий Иванович Бринкевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников.

Владислав Савельевич Просолович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников.

Юрий Николаевич Янковский – старший научный сотрудник кафедры физики полупроводников.

УДК 537.311.33

С.А. ВЬРКО

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КРИСТАЛЛАХ С ПРЫЖКОВОЙ МИГРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ПРИМЕСЯМ

The expressions for Debye – Hückel and Schottky – Mott screening length of external electrostatic field in the crystal semiconductor with hopping migrations of electrons (holes) over hydrogen-like donors (acceptors) is obtained. The existence of a “hidden” conducting layer in the hopping conductivity regime for semiconductors with small and high compensation degrees is predicted.