



УДК: 612.315.592.3

Якуббай САЙДИМОВ,

к.ф.-м.н., зав. лаб. Научно-исследовательского института
физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз
E-mail: saydimov56@mail.ru

Файзулла УМАРОВ,

докторант Научно-исследовательского института
физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз
E-mail: fajzullo.umarov.95@bk.ru

Рецензент: к.ф.-м.н. Тураев А.Р. Филiaal федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" в г. Ташкенте

IRRADIATION OF SINGLE-CRYSTAL SILICON BY PROTON BEAMS WITH ENERGIES FROM 350 TO 650 KEV

Abstract

This paper presents the results of measurements using the Hall effect of the main electrophysical parameters and surface characteristics on a scanning electron microscope (SEM) of irradiated samples in an EG-2 linear accelerator (electrostatic generator) with proton beam energies from 350 to 650 keV depending on the irradiation time (from 15 to 75 minutes).

Key words: electrostatic generator, EG-2, proton irradiation, Hall effect, scanning electron microscope, radiation resistance of materials, monocrystalline silicon.

ОБЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПУЧКАМИ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ОТ 350 ДО 650 КЭВ

Аннотация

В данной работе приведены результаты измерения с помощью эффекта Холла основных электрофизических параметров и поверхностных характеристик на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) облученных образцов в линейном ускорителе ЭГ-2 (Электростатический Генератор), с энергиями пучков протонов от 350 до 650 кэВ в зависимости от времени облучения (от 15 до 75 мин.).

Ключевые слова: электростатический генератор, ЭГ-2, облучение протонами, эффект Холла, сканирующий электронный микроскоп, радиационная стойкость материалов, монокристаллический кремний.

KREMNIY MONOKRISTALLARINI ENERGIYALARI 350 DAN 650 KEV GACHA BO'LGAN PROTON DASTALARI BILAN NURLANTIRISH

Annotatsiya

Ushbu maqolada energiyasi 350 dan 650 keV gacha bo'lgan proton dastalarining EG-2 chiziqli tezlatkichda (Elektrostatik generator) nurlantirilgan kremniy monokristallarining Holl effekti yordamida asosiy elektrofizik parametrlar va sirt xususiyatlarining skanerlovchi elektron mikroskopida (SEM) foydalangan holda o'lchash natijalari keltirilgan.

Kalit so'zlar: elektrostatik generator, EG-2, proton dastasi, Holl effekti, skanerlovchi elektron mikroskop, materiallarning nurlanish qarshiligi, monokristalli kremniy.

Введение. При производстве полупроводниковых приборов предъявляются жесткие требования к механической прочности, термической и радиационной стойкости пластин кремния. Так как, многие современные полупроводниковые приборы используются в средах радиационных излучений (космические корабли, атомные электростанции, угольные шахты с присутствующим радиационным фоном и т.д.), как известно [1], радиационные излучения являются источником деградации электрофизических параметров полупроводниковых приборов. Поэтому повышение радиационной стойкости полупроводниковых материалов и приборов на их основе и по сей день является актуальным.

Подготовка образцов и методика эксперимента. Для исследования нами были использованы образцы монокристаллического кремния марки КЭФ-40 (ориентация {111}) с удельным сопротивлением $32 \div 42 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, концентрация основных носителей заряда составляло $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, Холловская подвижность была равна $1200-1600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Образцы до облучения были подвергнуты механической и химической обработке, с поверхности образцов с помощью шлифовки, на стеклянной подложке с использованием абразивного, был удален слой равной $\sim 100 \text{ мкм}$ со всех сторон образцов. После механических обработок поверхности образцов было проведено химическая обработка. Химическая обработка (травление) является последовательностью химических воздействий на поверхность полупроводника и заключалась в том, чтобы удалить инородные загрязнения с поверхности монокристалла кремния с помощью химических реакций. В начале образцы кипятились в интервале 5-7 минут в толуоле, после чего кипятились в ацетоне более 2 минут. Образцы в азотной кислоте кипятились ровно 10 минут, после в растворе $\text{HF} + (\text{HNO}_3) + \text{CH}_3\text{COOH}$ в соотношении 5;3;5, так же образцы кипятились в химической смеси «царская водка» в течение 3 минут, после чего образцы были помещены в сосуд центрифуги с HF и прополаскивались. После каждой стадии химического воздействия образцы промывались дистиллированным или в деионизированной воде.

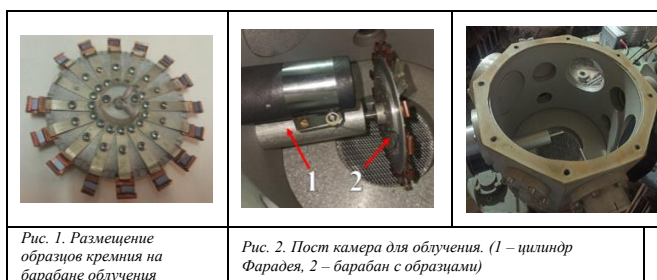


Рис. 1. Размещение образцов кремния на барабане облучения

Рис. 2. Пост камера для облучения. (1 – цилиндр Фарадея, 2 – барабан с образцами)

Облучение подготовленных образцов монокристаллического кремния проводился на линейном ускорителе ЭГ-2 (Электростатический Генератор), которая находится при НИИ ФПМ г. Ташкент. Подготовленные образцы были размещены на барабане облучения (см. рис. 1). После размещения поверхность образцов очищались от прикосновений и загрязнений возникших во время фиксации медных держателей образцов на барабан. Готовый барабан с образцами, в количестве 15 шт., помещались в пост камеру для облучения (рис. 2). Барабан с образцами крепился на регулируемую стойку камеры, в которую также был подключен цилиндр Фарадея (рис. 2 (1)) для измерения тока пучка. Далее крышка камеры закрывалась и начинался процесс откачки воздух до разряжения 10^{-5} - 10^{-6} мм рт. ст.

Подготовленные образцы кремния облучались пучками протонов с тремя разными энергиями. Параметры облучения представлены на табл. 1 ($I_{\text{инт}}$ (мкА) – интегральный ток пучка; N – количество протонов приходящее на образец; t (мин) – время облучения. При каждой энергии образцы облучались в интервале времени от 15 до 75 минут с шагом 15 минут.

Таблица 1.

№	t , (мин.)	$E_p = 350$ кэВ		$E_p = 500$ кэВ		$E_p = 650$ кэВ	
		$I_{\text{инт}}$, (мкА)	$N_p \cdot 10^{16}$	$I_{\text{инт}}$, (мкА)	$N_p \cdot 10^{16}$	$I_{\text{инт}}$, (мкА)	$N_p \cdot 10^{16}$
1.	15	32263	0,201	39556	0,247	31450	0,196
2.	30	72082	0,450	72314	0,451	71769	0,450
3.	45	101569	0,634	119358	0,745	101713	0,630
4.	60	217547	1,360	150613	0,941	150509	0,940
5.	75	667241	4,170	207520	1,300	207813	1,300

Количество протонов приходящее на образец был рассчитан с помощью формулы:

$$I_{\text{имп}} = \frac{I_{\text{инт}}}{t_{\text{общ}}} \cdot \frac{1}{100} \text{ [мкА/сек]}; N_p = I_{\text{имп}} \cdot t_{\text{общ}} = \frac{I_{\text{имп}}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot t_{\text{общ}}$$

После облучения были исследованы основные электрофизические параметры на установке Холла, результаты которого представлены на табл. 2.

Таблица 2.

350 кэВ					500 кэВ			
№	ρ , Ом·см	μ , см ² /(В·с)	$n \cdot 10^{14}$ см ⁻³	$N_p \cdot 10^{16}$	ρ , Ом·см	μ , см ² /(В·с)	$n \cdot 10^{14}$ см ⁻³	$N_p \cdot 10^{16}$
1.	37,2	1209	1,40	0,201	35,5	1641	1,05	0,247
2.	31,1	1568	1,28	0,450	31,0	1621	1,19	0,451
3.	34,1	1280	1,45	0,634	33,8	1645	1,30	0,745
4.	36,1	1487	1,17	1,360	33,1	1751	1,07	0,941
5.	28,8	1628	1,34	4,170	32,0	1282	1,50	1,300
650 кэВ								
№	ρ , Ом·см	μ , см ² /(В·с)	$n \cdot 10^{14}$ см ⁻³	$N_p \cdot 10^{16}$				
1.	36,0	1285	1,30	0,196				
2.	35,0	1361	1,30	0,450				
3.	33,8	1244	1,88	0,630				
4.	40,6	1265	1,20	0,940				
5.	36,1	1601	1,15	1,300				

Анализ полученных результатов. Как видно из таблицы 2 изменение основных электрофизических параметров после облучения образцов марки КЭФ-40 не наблюдается, это может быть связано с тем, что с помощью эффекта холла определяются объемные характеристики, а проникающая способность протонных пучков с энергиями от 350 до 650 кэВ относительно размеров образцов является малым, размеры образцов были равны 2х4х8 мм, и они взаимодействуют в основном с поверхностью монокристалла кремния. Полученные результаты указывают на необходимость более детального исследования поверхностных характеристик облученных образцов.

Поэтому нами были исследованы поверхностные структуры облученных образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) EVO MA10.

Для исследования образцы после облучения, проходили предварительную химическую обработку для удаления возникшего оксидного слоя в растворе фтороводорода. Далее образцы помещались на рабочую часть СЭМ. Полученные результаты приведены на рисунках 3-4. Из рис. 3 видно, что ускоренные протоны провзаимодействовали с поверхностью кремния в определенных местах.

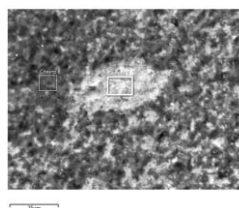
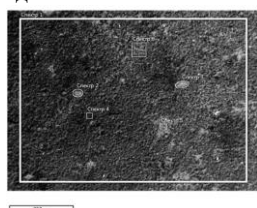


Рис. 3. Поверхность облученного образца

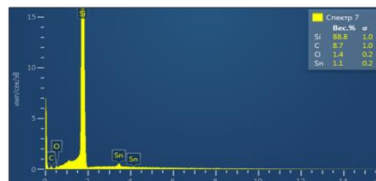
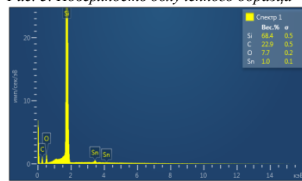


Рис. 4. Структурные данные облученного образца в разных точках

Диаграммы представленные на рис. 4, элементарный состав в кремнии, были получены относительно массы в точках попадания протонов. Общие результаты элементарного анализа в определенных точках на поверхности кремния представлены в табл. 3.

Таблица 3.

Образцы	Концентрация примесей относительно массы (%)					Время облучения (мин.)	Доза облучения ($N_p \cdot 10^{15}$)
	Si	C	O	Sn	Fe		
1 (не облученный)	79,6	16	2,8	1,4	0,3	-	-
2	67,9	22,1	9,1	1,0	-	20	1,2
	66,8	23,3	12,4	1,2			
	63,5	22,3	9,8	1,1			
	67,7	21,7	9,8	0,8			
	64,6	17,7	15,7	1,1			
3	67,2	24,7	7,0	1,3	-	40	2,4
	68,5	22,7	7,4	1,3			
	67,1	24,7	7,1	1,3			
	68,4	22,9	7,7	1,0			
	69,2	22,2	7,8	0,8			

Заключение. По данным элементарного анализа поверхности образцов до и после облучения видно, что относительная концентрация кремния уменьшилась, концентрация же углерода и кислорода повысилась. Мы предполагаем что причинами такого процесса могут быть следующие факторы:

- уменьшение концентрации кремния может быть связана с тем, что в ионопроводе присутствуют, в малых количествах, масляные пары (масленных насосов), и при попадании на поверхность образцов пары могут образовывать слой который будет экранировать поток электронов;
- увеличение концентрации кислорода можно объяснить тем, что протоны попадая в оксидный слой на поверхности образцов вбивают атомов кислорода в кремний;
- так как в ионопроводе ускорителя даже в вакууме 10^{-5} - 10^{-6} мм рт. ст. присутствуют атомы углерода (пары масел) и при ускорении протонных пучков они могут их захватывать и направлять на поверхность образцов, что влечет за собой увеличение концентрации углерода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродных И. П., А. П. Тютнев, В. Т. Семёнов. Радиационные эффекты в космосе. Часть 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники / – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 64 с.
2. Димс Дж., Дж. Винйард. Радиационные эффекты в твердых телах. М., 1960 стр. 11.
3. Гайдар Г.П., Отжиг радиационных дефектов в кремнии, Электронная обработка материалов, 2012, 48(1), 93-105.
4. Yong R.C., Corelli J.C. Photoconductivity Studies of Radiation Induced Defects in Silicon. Phys. Rev. B. 1972, 5(4), 1455–1467.
5. Sonder E., Templeton L.C. Gamma Irradiation of Silicon. I. Levels in n-Type Material Containing Oxygen. J. Appl. Phys. 1960, 31(7), 1279–1286.
6. Bemski G., Augustyniak W.M. Annealing of Electron Bombardment Damage in Silicon Crystals. Phys. Rev. 1957, 108(3), 645–648.
7. Watkins G.D., Corbett J.W. Defects in Irradiated Silicon: Electron Paramagnetic Resonance of Divacancy. Phys. Rev. 1965, 138(2A), A543–A544.