Известия НАН Армении, Физика, т.43, №5, с.348-354 (2008)

УДК 621.382

ДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В.А. СААКЯН

Национальный институт метрологии РА, Ереван, Армения

(Поступила в редакцию 25 декабря 2007 г.)

Исследовано влияние различного вида облучения (электроны, нейтроны, протоны, гамма) на основные свойства кремниевых полупроводниковых приборов. Большее внимание уделено транзисторам как наименее радиационно стойким структурам. Показано, что при протонном облучении изменение соответствующих параметров происходит при сравнительно меньших дозах облучения. Результаты объяснены на основе возникновения поверхностных каналов проводимости при облучении.

Развитие ядерной энергетики и космических исследований стимулирует углубленное изучение свойств полупроводниковых приборов в условиях действия различных корпускулярных и электромагнитных излучений. Это объясняется тем, что именно полупроводниковые приборы, особенно кремниевые, по своим параметрам, габаритам и надежности наиболее пригодны для работы в указанных условиях [1-5]. Анализ работ, выполненных с применением полупроводниковых приборов радиоэлектронной аппаратуры в условиях воздействия на нее ядерных излучений, свидетельствует о том, что в подавляющем большинстве случаев отказы в ее функционировании наступают в результате существенных изменений параметров транзисторов: ни один из характерных для них параметров не остается при этом неизменным. Так, например, пропорционально интегральному потоку быстрых нейтронов возрастают входное сопротивление и коэффициент обратной связи транзисторов в схеме включения с общей базой [6].

Однако изучение влияния радиации на конкретные параметры полупроводниковых приборов наталкивается на серьезные трудности. Даже два совершенно идентичных по типу транзистора могут вести себя по-разному в условиях воздействия радиации. На их поведение накладывает отпечаток технологический процесс изготовления приборов и методика проведения эксперимента. Тем не менее можно рассмотреть процесс с разделением влияния поверхностных и объемных эффектов на поведение приборов в условиях облучения. Преобладающим эффектом при облучении является возникновение каналов на поверхности приборов, которые приводят к изменению характеристик.

Вообще говоря, поверхностные эффекты начинают проявлять себя уже при дозах

порядка 10^3 рад, в то время как объемные эффекты проявляются только при дозах порядка 10^7 рад. Наиболее чувствительными к облучению параметрами являются обратный ток утечки для диодов, а для транзисторов – I_{k0} и B. Эти параметры в условиях воздействия радиации обычно ухудшаются. В некоторых частных случаях может наблюдаться их улучшение. Для диодов токи утечки при облучении могут увеличиваться на несколько порядков. С ростом дозы облучения ток или все время растет, или стремится к насыщению. Обратный ток коллекторного перехода транзистора I_{k0} изменяется аналогичным образом. Статический коэффициент усиления по току транзисторов B_{τ} обычно уменьшается с ростом дозы облучения и при значительных дозах может быть меньше единицы.

Одной из самых чувствительных к действию проникающего излучения характеристик полупроводников является время жизни неосновных носителей заряда, определяющее работу основных полупроводниковых приборов. Как правило, оно изменяется в несколько раз при дозах облучения, при которых изменения других характеристик, например, удельной проводимости, оказываются малыми. В таких условиях зависимость времени жизни от интегрального потока излучения (можно описать простым соотношением

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K\Phi, \qquad (1)$$

экспериментально проверенным в широком диапазоне возможных величин τ. В этом соотношении τ_0 - начальное время жизни, а K - коэффициент пропорциональности, определяющий скорость изменения времени жизни при облучении. В дальнейшем его будем называть коэффициентом радиационного изменения времени жизни. Он по сути определяет степень радиационной деградации приборов.

Величина коэффициента K определяется многими факторами, в том числе, скоростью введения рекомбинационных центров в запрещенную зону, их рекомбинационными свойствами (например, сечениями захвата ими электронов и дырок), а также их эффективностью - иначе говоря, уровнем заполнения их электронами, зависящим от положения уровня Ферми по отношению к энергетическим уровням этих центров. Математически коэффициент K может быть в общем случае выражен следующей формулой [6]:

$$K = [N_A \sigma_d(E) v(E)] \sum \eta_i (\sigma_{pi} v_p f_{ni} + \sigma_{ni} v_n f_{pi}). \qquad (2)$$

Произведение, заключенное в этой формуле в квадратные скобки, представляет собой не что иное, как скорость введения структурных дефектов на единицу количества воздействующего излучения. Она зависит как от вида излучения, так и от его энергетического состава. Произведение, стоящее под знаком суммы, определяет, в конечном итоге, рекомбинационные свойства и эффективность того или иного центра, образовавшегося в результате появления в кристаллической решетке структурного дефекта. В этом произведении η_i - скорость введения i-ого центра; σ_{pi}, σ_{ni} – сечение захвата дырки или электрона этим центром; v_{pi}, v_{ni} – средняя тепловая скорость дырки и электрона, и, наконец, f_{pi}, f_{ni} - функции, зависящие от положения уровня Фер-ми по отношению к энергетическому уровню i-ых центров; они определяют степень заполнения центров электронами и дырками.

Несмотря на то, что при облучении в запрещенную зону вводится целая система уровней [7,8], время жизни в облученном полупроводнике, как показывают эксперименты, определяется лишь одним-двумя доминирующими центрами. Экспериментально коэффициент K может быть определен из данных по измерению времени жизни неосновных носителей в образцах материала, подвергающегося облучению. Однако, его величина может быть определена и из результатов облучения полупроводниковых приборов. В случае транзисторов, например, ее можно вычислить из данных по скорости изменения обратной величины коэффициента передачи тока базы, если известно время переноса инжектированных носителей через область базы:

$$K = 1/t_{\text{пер}}\left[d\left(1/B\right)/d\Phi\right] \qquad (3)$$

Простота техники эксперимента, возможность дистанционного измерения в процессе облучения и получение большой статистики определяют преимущества использования приборов для измерения времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводниковом материале – важного параметра, определяющего также степень радиационной стойкости полупроводниковых приборов.

При изучении радиационных изменений параметров приборов оказывается удобным оперировать не абсолютными величинами α, $(1-\alpha)$ или B, а их относительными значениями, приведенными к исходным, т.е. α_Φ/α_0, $(1-\alpha_\Phi)/(1-\alpha_0)$ и B_Φ/B_0. Здесь и далее индексом Ф обозначены параметры транзисторов и других полупроводниковых приборов, достигаемые в процессе облучения или после него, а индексом 0 – начальные.

На рис.1 представлена вольт–амперная характеристика силовых диодов до и после облучения электронами с энергией 50 МэВ дозами 10^{14} эл/см^2 и 10^{15} эл/см^2. Это типичное поведение диодов при облучении – ухудшение выпрямительных свойств, т.е. кремниевый материал по электрическим свойствам приобретает более линейный характер. Радиационные изменения соответствующих параметров полупроводниковых приборов приведены на рис.2-4 и в табл.1. Видно, что эти параметры с увеличением дозы облучения ухудшаются, поэтому представляется важным оптимальный выбор дозы облучения для рекомендации их применения. В случае протонного облучения радиационные изменения происходят при более низких дозах радиации, что обусловлено большой массой протона по сравнению с электроном с одинаковым зарядом. В то же время нейтрон, не имея заряда, несмотря на почти одинаковую с протоном массу, имеет большую проникающую способность и больший объемный эффект. Поскольку радиационные изменения в основном определяются поверхностными явлениями, то протонное облучение оказывает большее деградирующее влияние на полупроводниковые приборы, а гамма-облучение - наоборот. Следовательно, для радиационной стойкости полупроводниковых приборов необходимо учесть не только тип материала и его проводимость (см. рис.2), но и вид облучения.

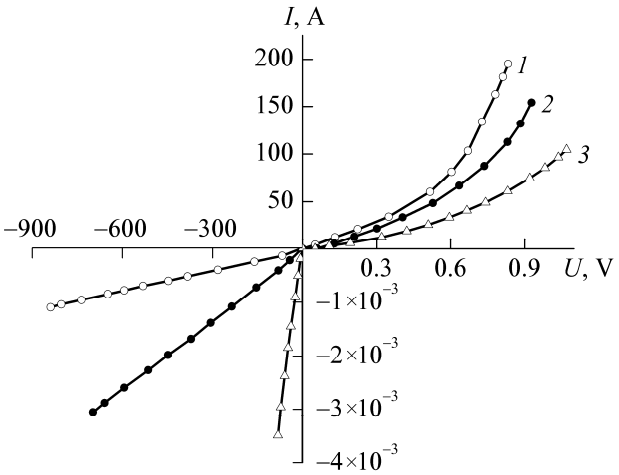

Рис.1. Вольт-амперная характеристика силовых полупроводниковых диодов до (1) и после облучения электронами с энергией 50 МэВ дозами 10^{14} эл/см^2 (2), 10^{15} эл/см^2 (3).

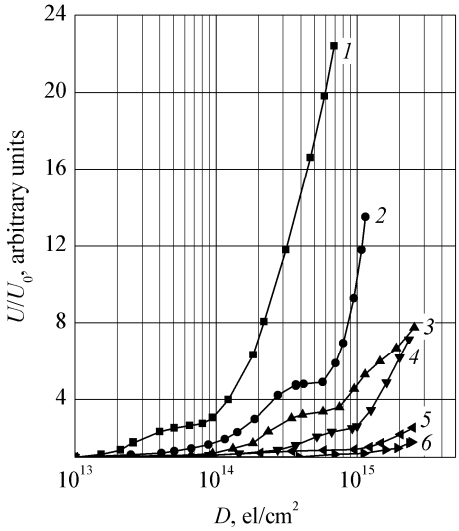

Рис.2. Зависимость относительного изменения прямого напряжения кремниевых диодов от дозы облучения электронами с энергией 50 МэВ с различными удельными сопротивлениями базового материала: 1 – 35 ом см, 2 – 15 ом см; 3 – 10 ом см; 4 – 5 ом см; 5 – 1 ом см; 6 – 0,4 ом см.

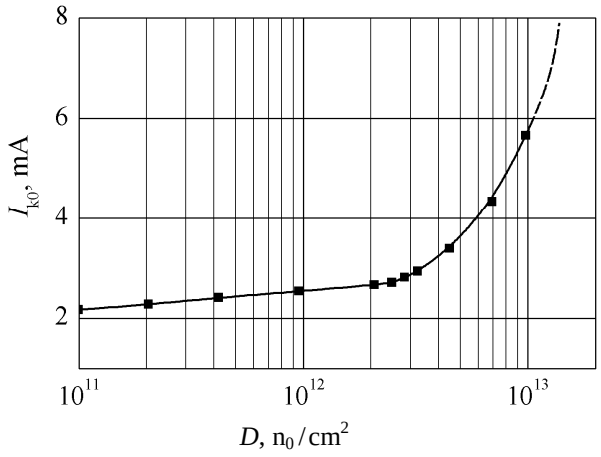

Рис.3. Зависимость обратного тока коллектора силовых транзисторов от дозы нейтронного облучения.

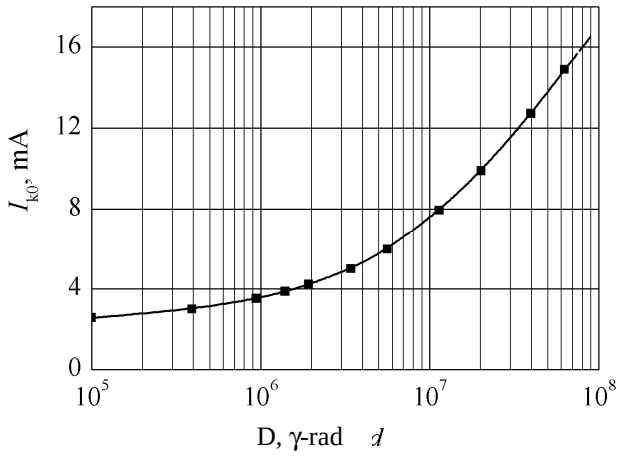

Рис.4. Зависимость обратного тока коллектора силовых транзисторов от дозы гамма-облучения.

Физические причины полученных результатов можно объяснить следующим образом. Поверхность полупроводникового прибора всегда покрыта слоями окиси, в результате чего плотность медленных акцепторных состояний на поверхности велика. В сухой атмосфере эти состояния пустые, они заполняются электронами после облучения. Образовавшийся таким образом отрицательный заряд создает канал на *n*-слое, что приводит к увеличению обратного тока. Во влажной среде происходит компенсация отрицательного заряда положительным, который образуется на поверхности кристалла. В результате каналообразование уменьшается, что ведет к уменьшению обратного тока. При очень большой влажности на поверхности накапливается большой суммарный положительный заряд, образуется канал на *p*-слое и обратный ток снова растет.

Табл.1. Параметры силовых транзисторов после облучения протонами с энергией 100 МэВ дозой 10^{12} см$^{-2}$.

N	$I_{к0}$, mA		$I_{э0}$, mA		$B_{ст}$		$U_{эб}$, V		$U_{кн}$, V		$U_{кэ}$, V	
1	2,4	2,9	0,25	0,2	12	7,1	2,7	2,9	2,5	2,8	45	40
2	1,2	2,2	1,2	0,9	8,5	6,6	2,4	2,8	2,4	2,9	55	50
3	4,3	4,9	0,4	0,8	20	11,2	2,6	3,1	2,3	2,7	50	50
4	2,2	2,9	0,4	0,7	21,4	10	3,4	3,7	3,1	3,8	60	55
5	4,4	5,6	0,4	0,8	25	11,2	4,5	4,6	4,2	5	70	65
6	6	7,5	0,4	0,6	16,6	13,8	2,5	2,7	4,1	4,8	65	60
7	4,4	5,5	0,4	0,5	40	18,6	3,4	3,8	3,1	3,9	55	55

Здесь $I_{эо}$ – обратный ток эмиттера, $U_{эб}$ - напряжение эмиттер–база, $U_{кн}$ - напряжение насыщения коллектора, $U_{кэ}$ - напряжение коллектор–эмиттер.

Приведенная модель является, в некотором смысле, основой также для объяснения поведения других облученных полупроводниковых приборов, представляющих собой различные конфигурации *p-n* переходов, и действует также в случаях приложения напряжения смещения к *p-n* переходам. Нами показано, что при увеличении обратного смещения электрическое поле вблизи поверхности перехода увеличивается и при определенной его величине происходит рассасывание отрицательного заряда поверхностных ионов вблизи перехода. В результате, протяженность канала сокращается, он уже не охватывает поверхностный слой вблизи перехода, и обратный ток уменьшается.

Основным результатом данной работы является определение радиационной стойкости полупроводниковых кремниевых диодов и транзисторов, в частности, определение “критических доз” облучения, при которых основные параметры претерпевают резкие изменения и применение соответствующих приборов не представляется возможным. Однако, в каждом конкретном случае нужно исходить из целесообразности использования данного прибора в определенных радиационных условиях с учетом базового кремниевого материала (см. рис.2).

Работа выполнена в Национальном Институте Метрологии РА. Экспериментальные установки для измерения параметров диодов и транзисторов собраны на основе промышленных приборов. Облучение было проведено на ускорителях ЕрФИ и ИФАН Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. **C.Leroy, P.-G.Rancoita.** Rep. Prog. Phys., **70,** 493 (2007).
2. **J.G.Loquet.** IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-48,** 2278 (2001).
3. **S.Duzellier**. Aerospace Science and Technology, **9,** 93 (2005).
4. **E.Normand**. IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-43,** 461 (2001).
5. **P.J.McNulty** et al. Radiation Physics and Chemistry, **43,** 139 (1994).
6. **Н.Риддл**. В сб. «Новые схемы на полупроводниковых приборах». Под ред. А.А.Со-колова, М., изд. ИЛ, 1961, с.9.
7. **И.И.Дончев, О.Ю.Панасюк** и др. В сб. «Моделирование радиационных дефектов». Л., изд. ФТИ АН СССР, с.58, 1990.
8. **В.Л.Винецкий, И.Р.Энтинзон, Г.А.Холодарь.** ФТП, **21**, 643 (1987).

Սիլիցիումային կիսահաղորդչային սարքերի պարամետրերի վրա տարբեր ճառագայթահարումների ազդեցությունը

Վ.Ա.Սահակյան

Հետազոտված է տարբեր ճառագայթահարման (էլեկտրոն, նեյտրոն, պրոտոն, գամմա) ազդեցությունը սիլիցիումային սարքերի հիմնական հատկությունների վրա: Հատուկ ուշադրություն է դարձված տրանզիստորների վրա՝ որպես ճառագայթահարման տեսակետից առավել անկայուն կառուցվածք: Ցույց է տրված, որ սարքերի հատկությունները փոփոխվում են պրոտոնների ավելի ցածր դոզաների դեպքում՝ համեմատած մյուս ճառագայթումներին: Ստացված արդյունքները բացատրված են սարքերի մակերեսի վրա լիցքային խոռոչների առաջացմամբ՝ ճառագայթահարման հետևանքով:

INFLUENCE OF DIFFERENT TYPE IRRADIATION ON THE PARAMETERS OF SILICON SEMICONDUCTOR DEVICES

V.A. SAHAKYAN

Different irradiation (electron, neutron, proton, gamma) influence on the main properties of silicon semiconductor devices was studied. Special attention was given on the transistors as a most sensitive structure to irradiation. It was shown that corresponding parameters change at lower doses in the case of proton irradiation in comparison with other irradiations. The results are explained in terms of formation of surface charge channels after irradiation.