

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ ПУТЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

И.В. Щемеров, П.Б. Лагов, С.П. Кобелева, В.Д. Кирилов
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Ленинский пр. 4, Москва 119049, Россия, schemerov.iv@misis.ru

Проведено исследование изменения времени восстановления обратного тока в выпрямительных диодах на основе монокристаллического кремния после облучения структуры высокоэнергетическими электронами. С увеличением флюенса облучения от 10^{14} до 10^{15} см⁻² время восстановления обратного тока падает от единиц миллисекунд до десятков микросекунд. При этом параллельно с ускорением переходных характеристик структуры стремительно деградируют. Ток насыщения возрастает на два порядка: с $7 \cdot 10^{-9}$ А/см² до $8 \cdot 10^{-9}$ А/см², а последовательное сопротивление растёт с 0.5 до 90 Ом. Показано, что измерение зависимости ёмкости от частоты позволяет оценить пределы оптимизации структур: частота, на которой ёмкость равна 1/2 от стационарной с облучением растёт, выходя на максимум, после чего существенно снижается из-за деградации проводимости. Это может выступать важным критерием при радиационной оптимизации полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: выпрямительные диоды; облучение высокоэнергетическими электронами; время жизни; время восстановления обратного тока; радиационно-технологическая обработка.

OPTIMIZATION OF THE TRANSIENT CHARACTERISTICS OF THE RECTIFIERS UNDER HIGH-ENERGY ELECTRON IRRADIATION

Ivan Schemerov, Petr Lagov, Svetlana Kobeleva, Viktor Kirilov
National University of Science and Technology "MISIS"
4 Leninsky Ave., 119049 Moscow, Russia, schemerov.iv@misis.ru

Measurements of the current-voltage, capacitance-voltage, capacitance-frequency characteristics and reverse recovery profiling were provided for silicon-based rectifiers. P-n-junction rectifiers were irradiated by 5 MeV electrons with fluxes from 10^{14} to 10^{15} cm⁻². It is shown that after 5 MeV electron irradiation reverse-recovery time decreases and this decreasing changes monotonously with irradiation dose (from 2.2 ms to 15 us for 10^{15} cm⁻²). At the same time series resistance increases dramatically (from 0.5 to 90 Ω) that indicates strong degradation of the high-frequency properties. We can use next criteria for optimal radiation dose: the irradiation level associated with the maximum of boundary frequency indicates the optimum in terms of switching speed. Before this dose maximum frequency is limited by reverse-recovery time of diode. After this dose the limiting factor is the relaxation time of RC-circuit, where R is the series resistance of the diode, C – capacitance of the SRC-region.

Keywords: rectifiers; high-energy electron irradiation; recombination lifetime; reverse-recovery time; radiation treatment.

Введение

Радиационная обработка является одним из важных технологических этапов в производстве полупроводниковых приборов. Радиационная обработка позволяет оптимизировать такие важные характеристики, как рабочую частоту, скорость релаксации фототока и время обратного восстановления. При этом облучение неизбежно ухудшает другие рабочие ха-

рактеристики устройств. Например, для выпрямительных диодов величина последовательного сопротивления в прямом включении должна быть как можно меньше, чтобы вклад омической составляющей базовых областей не сильно менял падение напряжение. Облучение существенно меняет концентрацию дефектов, уменьшая подвижность носителей и зачастую компенсируя часть электрически

активной примеси. Таким образом последовательное сопротивление возрастает, что отрицательно сказывается на рабочих характеристиках выпрямительного диода.

Целью данного исследования являлся анализ соотношений между временем восстановления обратного тока в выпрямительных диодах на основе монокристаллического кремния, последовательным сопротивлением и рабочей частотой устройства после облучения электронами с энергией 5 МэВ.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись коммерчески доступные выпрямительные диоды 1N4007 на основе монокристаллического кремния. Несколько серий образцов подвергалось последовательному облучению электронами с энергией 5 МэВ. Облучение образцов производили в лаборатории радиационных технологий ИФХЭ РАН на линейном ускорителе электронов. Образцы были разделены в соответствии с итоговым флюенсом на несколько групп. Параметры образцов из разных групп сравнивались между собой.

Измерение времени восстановления обратного тока производилось по методике, описанной ранее в [1].

Результаты и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики измеренных образцов приведены на рис. 1(а). На рис. 1(б) показано, как с увеличением рабочей частоты меняется емкость структуры. Величины последовательного сопротивления R_s , тока насыщения I_s , граничной частоты f_{gr} и времени восстановления обратного тока t_{rr} приведены в табл. 1.

Видно, что начальная величина последовательного сопротивления, составляющая незначительные 0.5 Ом, после облучения увеличилась почти до 100 Ом, что совершенно исключает использование этих устройств в высокочастотных применениях. Кроме того, значительно выросла

утечка в обратном включении: с десятков пА до десятков нА.

Таблица 1. Измеренные параметры диодов

Флюенс, см^{-2}	f_{gr} , кГц	R_s , Ом	I_s , А/ см^2	t_{rr} , мкс
0	300	0.5	$7 \cdot 10^{-9}$	2000
$8 \cdot 10^{13}$	600	0.8	$2 \cdot 10^{-8}$	1000
$1.5 \cdot 10^{14}$	800	1.2	$4 \cdot 10^{-8}$	130
$6 \cdot 10^{14}$	25	40	$4 \cdot 10^{-7}$	20
$1.2 \cdot 10^{15}$	20	90	$8 \cdot 10^{-7}$	14

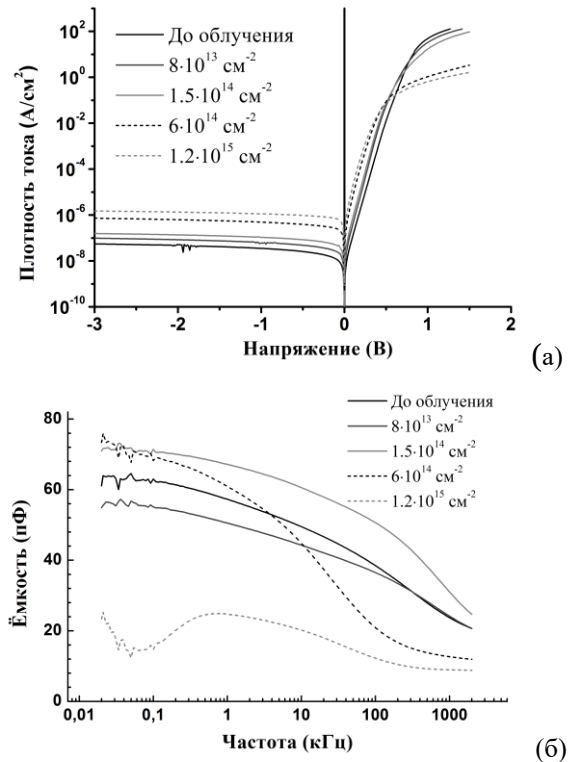


Рис. 1. Характеристики диодов до и после облучения: а – вольт-амперные характеристики; б – зависимость емкости от частоты

Существенное изменение последовательного сопротивления привело к ограничению частоты. Если считать высокочастотным пределом частоту, при которой емкость падает на 3 дБ по сравнению с низкочастотной, то видно, что высокочастотный предел меняется с дозой облучения немонотонно. Это связано с противоположно направленными эффектами. Во-первых, при облучении увеличивается концентрация рекомбинационных центров (как правило, это пары Френкеля [2]), что уменьшает рекомбинационное время жизни τ_v и, таким образом, уменьшает харак-

терные релаксационные времена в структуре. Во-вторых, увеличение R_s приводит к увеличению времени релаксации RC-цепочки τ_{RC} , образованной сопротивлением базовой области и емкостью ОПЗ. В необлученном образце τ_v существенно больше τ_{RC} , поэтому рабочая частота определяется в первую очередь им. При увеличении τ_{RC} соотношение меняется, и частота начинает падать вслед за увеличением τ_{RC} .

В структуре с р-п-переходом сложно напрямую наблюдать характерное время жизни неравновесных носителей заряда. Вместо этого, как правило, исследуется время t_{RR} , то есть время, за которое при переключении диода из открытого состояния в закрытое величина тока уменьшается до стационарного значения [3]. Графики переключения диодов из открытого состояния в закрытое приведены на рис. 2.

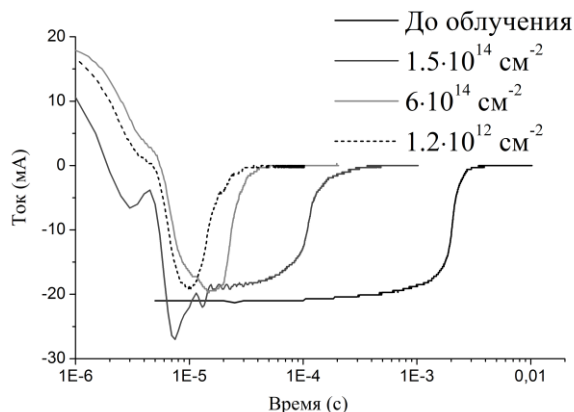


Рис. 2. Кривые восстановления обратного тока

Видно, что в первые моменты при переключении необлученного диода из открытого состояния в закрытое наблюдается классическая «полочка» обратного тока большой величины. После облучения продолжительность этого процесса уменьшается в разы, и после облучения флюенсом $1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ достигает единиц микросекунд. Тем не менее, граничная частота устройства уменьшается, так как большая величина последовательного сопротивления не дает структуре переключе-

чаться с достаточной скоростью. Если говорить о высокочастотном пределе, то оптимальным флюенсом облучения для данной структуры можно считать $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$. До этого предела время восстановления обратного тока (основная характеристика для импульсных выпрямительных диодов) уменьшается с дозой облучения, после нее начинается существенный рост последовательного сопротивления и существенно падает граничная частота, связанная с перезарядкой ОПЗ.

Заключение

Время восстановления обратного тока вместе с частотной зависимостью емкости позволяют оценить пределы радиационной модификации параметров выпрямительных диодов. Так, показано, что облучение высокоэнергетическими электронами ускоряет процесс обратного восстановления тока при переключении. Однако значительная доза облучения приводит к ухудшению высокочастотных свойств диодов из-за деградации последовательного сопротивления.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ, соглашение №075-15-2022-581.

Библиографические ссылки

1. Щемеров И.В., Поляков А.Я., Лагов П.Б., Кобелева С.П., Кочкова А.И., Куланчиков Ю.О., и др. Влияние центров захвата, внесенных облучением протонами с энергией 1 МэВ, на время восстановления обратного тока в диодах Шоттки на основе Ga_2O_3 . *Заводская лаборатория. Диагностика материалов* 2023; 89(6): 41-45.
2. Козловский В.В., Васильев А.Э., Емцев В.В., Оганесян Г.А., Колгатин С.Н. Образование пар Френкеля в кремнии под действием электронов и протонов высоких энергий. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки* 2011; 122(2): 13-21
3. Schroder D.K. Semiconductor material and device characterization. Tempe, AZ: Wiley-interscience, 2006. 420 с.