

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КРЕМНИЕВЫХ $p-i-n$ -ДИОДОВ

К. ф.-м. н. В. Л. Перевертайло

НПП «БИТ»
Украина, г. Киев
detector@carrier.kiev.ua

Разработана конструкция и технология кремниевых $p-i-n$ -диодов с толстой базой для измерения дозы нейтронного излучения. Изготовлены и исследованы экспериментальные образцы нейтронно-чувствительных детекторов. Исследовалось влияние генерационно-рекомбинационных процессов в объеме и на поверхности прибора на его электрофизические и радиационные характеристики. Получены зависимости падения напряжения на диоде от дозы до 5 кРад, чувствительность составляла 2—3 мВ/Рад. Объяснен механизм деградации проводимости диода вплоть до полного ее прекращения за счет дефектообразования, вызванного нейтронным облучением.

Ключевые слова: дозиметр нейтронов, $p-i-n$ -диод с толстой базой, генерационно-рекомбинационные процессы, деградация проводимости.

Применение $p-i-n$ -диодов для измерения дозы нейтронного излучения [1], несмотря на их очевидные недостатки (феддинг, температурная зависимость, разброс параметров), является привлекательным благодаря их малым размерам, простой измерительной схеме, низкому питающему напряжению, высокой механической прочности.

Измерение дозы основано на изменении удельного сопротивления и времени жизни τ неосновных носителей заряда (н. н. з.) полупроводникового материала $p-i-n$ -диода при взаимодействии с нейтронами, что приводит к изменению напряжения прямого смещения $U_{пр}$, пропорциональному полученной дозе нейтронов. При облучении нейтронами наблюдается изменение концентрации мелких доноров и акцепторов, приводящее к изменению удельного сопротивления в базе, изменение концентрации глубоких уровней, приводящее к изменению времени жизни н. н. з., образование различных точечных дефектов и кластеров дефектов. Все эти процессы оказывают влияние на величину прямого тока в диоде и падение напряжения в базе, которые используются для определения дозы. Эти параметры также очень чувствительны к генерационно-рекомбинационным процессам в объеме и на поверхности прибора, на которые существенное влияние оказывает чистота исходного материала и технологические процессы и конструкция прибора.

В настоящей работе исследовалось влияние описанных факторов и процессов на радиационные характеристики кремниевых $p-i-n$ -диодов. Различные условия генерационно-рекомбинационных процессов задавались конструкцией чувствительной области диодов при их проектировании и изготовлении. Исследования проводились в ходе тестирования и опытной эксплуатации нескольких партий нейтронно-чувствительных $p-i-n$ -диодов. Конструкция $p-i-n$ -диода показана на рис. 1.

В процессе исследований выявлена существенная зависимость чувствительности дозиметра как от длины базы диода, так и от поперечного сечения базы. Это связано с уменьшением времени жизни инжектированных носителей из-за их рекомбинации на боковых гранях кристалла.

В качестве основного дефекта решетки, приводящего к уменьшению времени жизни н. н. з. при облучении, принято образование областей разупорядочивания с образованием области пространственного заряда размером порядка 200 нм, описанных в [2]. Эти области собирают основные носители, обездвиживая их, вызывая рост удельного сопротивления и облегчая рекомбинацию неосновных носителей в базе. Возникновение подобных дефектов предполагается и на боковых гранях после резки, что подтверждается как сходством характера роста $U_{пр}$ после резки, так и его снижением при нанесении на боковые грани изолирующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ , вызывающей снижение электрического поля вблизи плоскостей реза.

Время жизни n , n , z , τ в базе изготовленных диодов до и после резки составляет 275 и 30 мкс соответственно, из чего можно заключить, что основной причиной снижения чувствительности при малых дозах является рекомбинация на боковых гранях. Для улучшения чувствительности диодов при дозах меньше 200 Рад необходимо минимизировать возникновение дефектов в процессе резки и применять их дезактивацию после нее. Более предпочтительной является круглая форма диода.

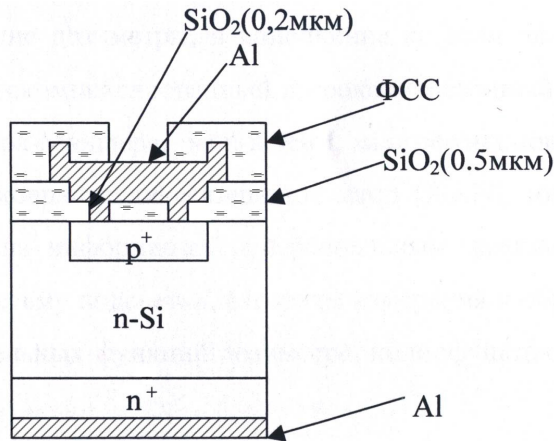


Рис. 1. Конструкция нейтронно-чувствительного $p-i-n$ -диода с толстой базой и локальным $p-n$ -переходом (не в реальном масштабе)

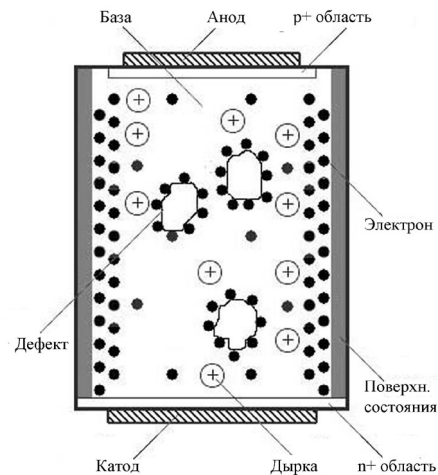


Рис. 2. Рекомбинация инжектированных дырок на исходных дефектах и дефектах, вызванных облучением в объеме $n-Si$

Исследована также зависимость τ в процессе облучения от дозы нейтронов D . Установлен значительный разброс значений τ на разных образцах одноптипных диодов, что, по-видимому, связано с влиянием боковых граней, однако зависимость $U_{пр}(D)$ значительно более предсказуема и монотонна, чем $\tau(D)$, что объясняется компенсирующим влиянием сопротивления базы R_b .

Разработана полуэмпирическая модель $p-i-n$ -диода с толстой базой с использованием эквивалентного диода по методике [3], позволяющая оценить сопротивление модулированной базы, падение $U_{пр}$ на $p-n$ -переходе и на базе, динамическое сопротивление базы R_d , перехода и $p-i-n$ -диода в целом. Измерение $U_{пр}$ и R_d диода позволяет при использовании указанной модели определить отклонение скрытых параметров диода от расчетных и вовремя скорректировать техпроцесс или провести отбраковку готовых изделий.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rosenfeld A. B. Advanced semiconductor dosimetry in radiation therapy // In book A. Rozenfeld (Eds.): Concepts and trends in medical radiation dosimetry.— Melville, N. Y: American Institute of Physics, 2011.—P. 48–74.
2. Bertolotti M., Vook F. L. Radiation effects in semiconductors.— New York, Plenum Press, 1968.
3. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем.— Москва: Энергия, 1973.

V. L. Perevertailo

The effect of technology and design on the characteristics of neutron-sensitive silicon $p-i-n$ -diodes

The design and technology of silicon $p-i-n$ -diodes with a thick base for measuring the dose of neutron radiation is developed. Experimental samples of neutron-sensitive detectors were fabricated and investigated. The influence of the generation-recombination processes in the volume and on the surface of the device on the electrophysical and radiation characteristics of the detector was investigated. The dependences of the voltage drop across the diode on the dose up to 5 krad were obtained, the sensitivity was 2–3 mV / rad. The mechanism of degradation of the conductivity of the diode up to its complete cutoff is explained due to defect formation caused by neutron irradiation.

Keywords: neutron dosimeter, PIN diode with a thick base, generation-recombination processes, conductivity degradation.