

The influence of ultrasonic waves on the characteristics of the radiation detector

Abdumalik Gaibov

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

E- mail: gaibov.1954@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of a study of the field dependences of charge losses, silicon diffusion detectors that allow identifying single atoms and their clusters acting as charge carrier capture centers. In electric fields $E > 1470$ V/cm, there is an effective decrease in the capture processes, which manifests itself in the form of straightening of the field dependences of charge losses and in the narrowing of spectral lines. Effects - an ultrasonic field with an intensity of $I^* = 0.4$ W / cm² and a frequency of $f = 15$ MHz, on samples for a time $t \leq 45$ minutes, leads to an increase in the amplitude of the signal. It is established that ultrasonic exposure leads to a decrease in charge loss, drift time and an improvement in the energy resolution of detectors. It should also be noted that fluctuations of the impurity relief in the Si-p-type volume are smoothed out after low-power ultrasonic waves pass through it for a long time, as evidenced by a significant decrease in the effective size of local defect clusters.

Key words: ultrasound, solid state diffusion detector, the losses charge, the drift time, the local concentrations of impurity atoms

УДК: 53.043;53.023;539

Влияния ультразвуковых волн на характеристики детектора излучения

Абдумалик Гаиров

Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан

E- mail: gaibov.1954@mail.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследования полевых зависимостей потерь заряда кремниевых диффузионных детекторов, которые позволяют идентифицировать одиночные атомы и их скопления, выступающие в роли центров захвата носителей заряда. В электрических полях $E > 1470$ В/см происходит эффективное уменьшение процессов захвата, что проявляется в виде спрямления полевых зависимостей потерь заряда и в сужении спектральных линий. Воздействия – ультразвуковое поле интенсивностью $I^* = 0,4$ Вт/см² и частотой $f = 15$ МГц, на образцы в течение времени $t \leq 45$ минут, приводит к росту амплитуды сигнала. Установлено, что ультразвуковое воздействие приводит к уменьшению потери заряда, времени дрейфа и улучшению энергетического разрешения детекторов. Также следует отметить, что флуктуации рельефа примеси в объеме Si-p-типа сглаживаются после прохождения через него ультразвуковых волн малой мощности в течение длительного времени, о чем свидетельствует значительное уменьшение эффективного размера локальных скоплений дефектов.

Ключевые слова: ультразвук, полупроводниковый диффузионный детектор, потеря заряда, время дрейфа, локальные скопления примесных атомов

1. Введение

При наличии в объеме полупроводника примесей или дефектов структуры кристаллов в запрещенной зоне возникают локализованные состояния. Такие состояния могут быть центрами захвата (ловушками) для носителей заряда. Иногда, вследствие различных причин, в объеме полупроводника возникают скопления точечных дефектов, представляющие собой крупномасштабные ловушки (КМЛ) с довольно высокими значениями сечений захвата до 10^{12} см². Такая неупорядоченность распределения концентрации точечных дефектов в объеме кристалла приводит к возникновению случайных полей, влияющих на процессы переноса заряда в полупроводниковых приборах. Исследование таких скоплений дефектов представляется интересным и важным с точки зрения их природы, механизма образования и степени влияния на характеристики полупроводниковых приборов. Одним из таких приборов

является полупроводниковый диффузионных детекторов (ППД) излучения на основе кремния, исследование характеристик которого позволяет получить информацию о природе и структуре локальных неоднородностей.

Целью данного исследования являлось, используя метод анализа полевых зависимостей потерь заряда $\lambda(1/E)$, изучение влияния электрических и ультразвуковых полей на электрофизические и спектрометрические характеристики диффузионных приемников излучения.

2. Методы и исследования

Спектрометрический метод определения примесного состава рассматривается в ряде работ [1,2]. Форма спектральной линии зависит от множества процессов, происходящих в объеме детектора, и несёт информацию и о свойствах исходного материала.

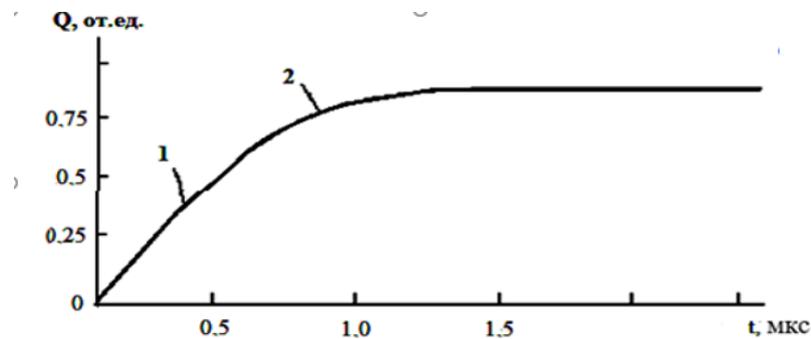


Рисунок 1. Формы зарядовых импульсов Si-n-p-детекторов: 1-быстрая компонента зарядового импульса, обусловленная отсутствием захвата; 2-медленная компонента, обусловленная процессами выброса.

Поэтому анализ формы амплитудного спектра позволяет определить характер потерь неравновесных носителей заряда (ННЗ) и параметры центров захвата, зависящих от их концентрации N_t , сечения захвата σ и тепловой скорости V_T . Величина постоянной захвата τ_3 определяется следующим выражением:

$$\tau_3 = 1/N_t \cdot \sigma \cdot V_T$$

Постоянная захвата в свою очередь определяет уменьшение амплитуды зарядового сигнала детектора, так как идут потери неравновесных носителей заряда $\lambda = t_{др}/n \tau_3$ вследствие захвата на ловушки ($t_{др}$ -время дрейфа, n -численный коэффициент).

В детекторе одновременно происходят процессы захвата и выброса носителей и в этом случае, форма зарядового импульса имеет вид, представленный на рисунке 1. Быстрая компонента зарядового сигнала определяется дрейфом носителей, не испытавших захват, появление медленной компоненты связано с процессом захват-выброс, что и определяет наличие дефицита амплитуды сигнала λ_0 . Величина дефицита амплитуды сигнала, усиленного и сформированного дифференцирующей и интегрирующей цепочками усилителя (время

формирования $\theta = \theta_{\text{диф}} = \theta_{\text{инт}}$) сигнала Δu , поступающего на вход амплитудного анализатора, не всегда пропорциональна λ_0 .

Для определения примесного состава материала детектора используется зависимость результирующей амплитуды сигнала от постоянной времени его формирования $\theta = RC$. При этом учитывается, что время дрейфа носителей много меньше постоянной времени формирования. Проведенный расчет показывает, что нормированный на свое максимальное значение дефицит $\lambda(\theta)$ зависит от отношения τ_v/θ в соответствии с рисунком 2. Полученная графическая зависимость позволяет по экспериментальным значениям $\lambda(\theta)/\lambda_0$ и θ определять постоянные выброса с центров захвата. Далее, из анализа формы спектральной линии можно решить вопрос о характере потерь носителей заряда, то есть определить, происходит захват ННЗ на одиночные центры, или потери связаны с наличием крупномасштабных ловушек. Для этого производится анализ зависимости потерь заряда от величины обратной дрейфовой скорости носителей, либо от величины обратной напряженности электрического поля.

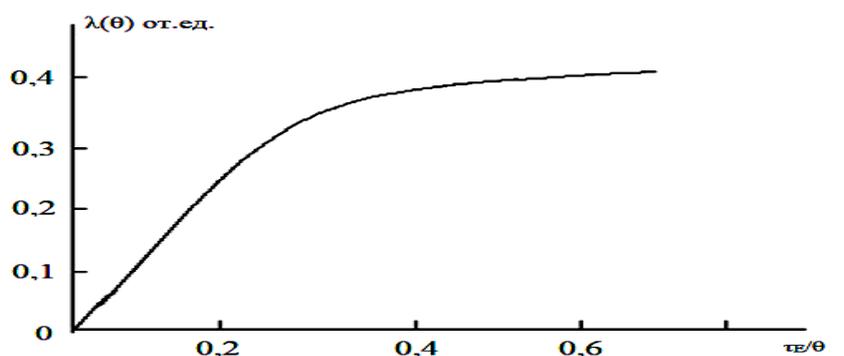


Рисунок 2. Теоретическая зависимость потерь заряда $\lambda(\theta)$ от постоянной выброса τ_v и времени формирования сигнала θ .

Для изготовления кремниевых диффузионных детекторов использовались слитки монокристаллического кремния р-типа с удельным сопротивлением $\rho=(10\div 14)\cdot 10^3 \Omega\text{см}$ и временем жизни неосновных носителей заряда $\tau=450\div 650$ мкс, а также и более низкоомные слитки р-Si с $\rho\leq(2\div 5)\cdot 10^3 \Omega\text{см}$ и $\tau=800\div 100$ мкс. Концентрация кислорода N_{O_2} составляла не более 10^{16}см^{-3} и плотность дислокаций $N_D\sim 10^4 \text{см}^{-2}$. Слитки, имевшие форму цилиндра, разрезались на пластины толщиной до 0,5 мм. Пластины имели площадь от 0,25 см^2 до 2,0 см^2 . Si-пластины шлифовались с обеих сторон абразивным порошком M15. После соответствующей химической обработки на одну из сторон Si-пластин напылялся алюминий (Al) толщиной $l\approx 0,45 \text{ мкм} \div 0,5 \text{ мкм}$, при данной технологической процедуре края Si-пластины были защищены маской. После этого на другую сторону Si-пластины наносился раствор пятиоксида фосфора P_2O_5 и проводилась сушка данного покрытия. Следующей технологической операцией являлся процесс диффузии фосфора в Si-пластины. Образцы,

расположенные в кварцевых кассетах, помещались в диффузионную печь. Диффузия фосфора проводилась при температуре $T = 1073$ К в потоке инертного газа в течение времени $t = 60$ минут. Затем температура медленно понижалась до комнатной. Алюминий, осажденный на Si-пластину, сплавляется с ней при $T \approx 820$ К и затем, диффундируя из расплава в объем Si-пластины, образует сильнолегированный p^+ -слой кремния. После охлаждения Si-пластинка проходит ряд химико-технологических операций по очистке и удалению фосфорносиликатного стекла на p^+ -слое, полученного диффузией фосфора. На входное окно Si-n-p-структуры напылялось золото плотностью около $30 \div 50$ мкг/см². Электрические контакты к n- и p-слоям изготавливались в виде прижимных или присоединением тонких металлических проволочек с помощью проводящих серебряных паст.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Полученные экспериментальные зависимости $\lambda(1/E)$ свидетельствуют о неоднородности потенциального рельефа (см. рисунок 3, кривая 1) чувствительной области детектора.

Во-первых, наблюдается отчетливое отклонение от линейности, проявляющееся в виде ступеней в определенных интервалах напряженностей электрических полей вплоть до $E \approx 1,5$ кВ/см. Разрешаются три ступени: первая ступень – интервал $E_1 \approx (0,384 \div 0,500)$ кВ/см; вторая ступень- интервал $E_2 \approx (0,500 \div 0,714)$ кВ/см и третья ступень - интервал $E_3 \approx (0,714 \div 1,470)$ кВ/см.

Во-вторых, при наблюдаемых значениях напряженности электрического поля $E_4 > 1,470$ кВ/см происходит резкое уменьшение потерь заряда λ . Данный участок зависимости $\lambda(1/E)$ имеет линейный вид, что совпадает с теоретическими выводами об увеличении времени жизни с ростом напряженности электрических полей, при которых дрейфовая скорость выходит на насыщение.

Важным моментом является изменение полевых зависимостей потерь заряда $\lambda(1/E)$ после облучения ПДД-Si-n-p-детектора ультразвуковыми волнами с частотой $f = 15$ МГц и интенсивностью $I^* = 0,4$ Вт/см² в течение времени $t = 45$ минут.

На рисунке 3 (кривая 2) можно отчетливо наблюдать сглаживание «ступеней» зависимости $\lambda(1/E)$, характеризующих отдельные микрообъемы чувствительной области детектора, где ранее происходил сильный захват неравновесных носителей заряда (рисунок 3, кривая 1).

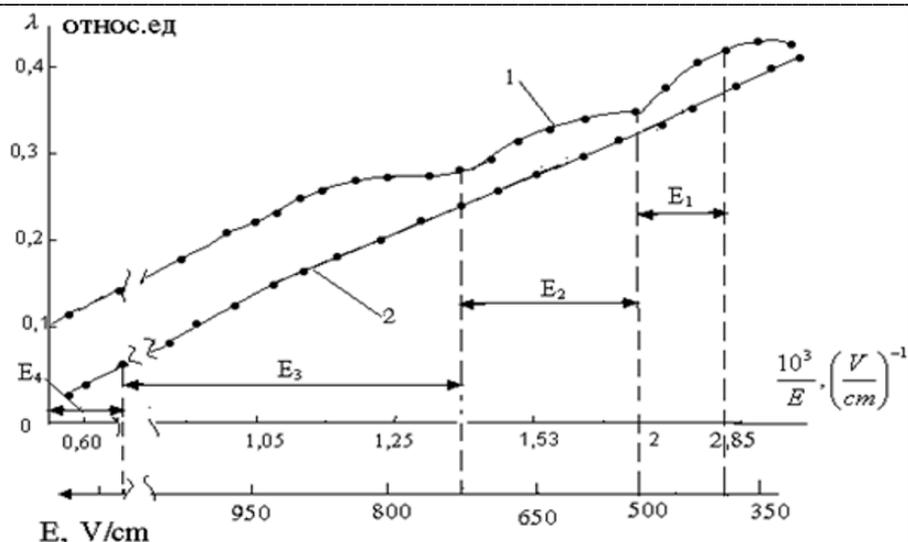


Рисунок 3. Полевые зависимости потерь заряд Si-n-p-детектора до (кривая 1) и после облучения ультразвуковыми волнами интенсивностью $I=0.4 \text{ Вт/см}^2$, $f=15 \text{ МГц}$ в течение $t = 45 \text{ мин}$ (кривая 2). $T= 290\text{К}$.

Время нарастания зарядовых импульсов (равное времени дрейфа $t_{др}$ носителей через чувствительную область до контакта) уменьшилось довольно существенно с величины $t_{др}= d_1/V_{др}= 0,0271 \cdot 10^{-4} \text{ см} / 5 \cdot 10^6 \text{ см/с} = 542 \text{ нс}$ до величины $t_{др}^1= d/V_{др}= 0,0257 \cdot 10^{-4} \text{ см} / 5 \cdot 10^6 \text{ см/с} = 515,2 \text{ нс}$. Значение $V_{др}$ равно $5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ выбрано для областей электрических полей $E < E_s$, то есть, где не наблюдается разогрев неравновесных носителей заряда в сильных электрических полях [3,4]. В представленном ПДД-Si-n-p-детекторе потери заряда в основном связаны с локальными скоплениями примесных атомов, о чем свидетельствует наличие «ступеней» на зависимости $\lambda(1/E)$, рисунок 3. Эти потери в общем случае определяются размером и концентрацией таких скоплений и не зависят от величины дрейфовой скорости носителей $V_{др}$.

Таким образом, наблюдаемое уменьшение потерь заряда (сглаживание «ступеней»), уменьшение времени дрейфа и улучшение энергетического разрешения под воздействием ультразвукового поля позволяет сделать следующие выводы.

4. Заключение

В электрических полях $E > 1470 \text{ В/см}$ происходит эффективное уменьшение процессов захвата, что проявляется в виде спрямлении полевых зависимостей потерь заряда и в сужении спектральных линий. Ультразвуковое поле интенсивностью $I^* = 0,4 \text{ Вт/см}^2$ и частотой $f = 15 \text{ МГц}$, воздействуя на образцы в течение времени $t \leq 45 \text{ минут}$, приводит к росту амплитуды сигнала, сужению спектральных линий, улучшению энергетического разрешения до 12% и падению величины электрической емкости приемников примерно до 5 %. Подобное необратимое изменение характеристик Si -n-p-приемников происходит из-за распада скоплений примесных атомов в ультразвуковом поле. В результате происходит сглаживание

потенциального рельефа в объеме чувствительной области, что способствует более эффективному и быстрому сбору неравновесных носителей заряда на электрические контакты Si-n-p-приемников излучения. При этом, как показывают оценки, время сбора носителей заряда уменьшается примерно до 4-5% также. Флуктуации рельефа примеси в объеме Si-p-типа сглаживаются после прохождения через него ультразвуковых волн малой мощности в течение длительного времени, о чем свидетельствует значительное уменьшение эффективного размера локальных скоплений дефектов.

Список литературы

- [1] Акимов, Ю. К. Кремниевые детекторы излучения (обзор) / Ю. К. Акимов. – Москва: 12ПТЭ, 2007. – № 1. – 5-34 с.
- [2] Бойко, В. И. Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов / В. И. Бойко, И. И. Жерин, В. Д. Каратаев, Ю. В. Недбайло, М. Е.Силаев. – Москва: МНТЦ «Ответственная наука», 2011. – 356 с.
- [3] Заверюхина, Н. Н. Акустостимулированное изменение плотности и энергетического спектра поверхностных состояний в монокристаллах p-кремния / Н. Н. Заверюхина, Е. Б. Заверюхина, С. И. Власов, Б. Н. Заверюхин // Письма в Журнал технической физики. – 2008. – № 34(6). – С. 36-42.
- [4] Gaibov, A. G. Acoustostimulated diffusion of gold atoms into highly doped N⁺-Layers of Silicon / A. G. Gaibov, K. I. Vakhobov // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2020. – № 7(7). – P. 14455-14461.