

## АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАДИАЦИОННО ОБЛУЧЕННЫХ КРЕМНИЕВЫХ $p^+nn^+$ -СТРУКТУРАХ

А.З. Рахматов<sup>2</sup>, А.В. Каримов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” АН РУз (Ташкент)  
Узбекистан

<sup>2</sup>ОАО “Foton” (Ташкент)  
Узбекистан

Поступила в редакцию 12.10.2012

На основе экспериментальных данных зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от радиационного облучения сделано заключение, что зависимость  $K_{\tau_0}/K_{\tau}(\Phi)$  от  $\rho(\Phi)/\rho(0)$  с высокой степенью достоверности ( $R^2 = 0,96$ ) аппроксимируется прямой линией и по сути она очень близка к известной формуле для времени жизни неосновных носителей заряда при больших концентрациях ловушек  $\tau_p = \tau_{p0}(1 + N_{cm}/n_0)$ . При этом зависимость  $K_{\tau}$  от флюенса нейтронов вероятнее всего определяется уменьшением концентрации основных носителей под воздействием облучения.

**Ключевые слова:** ограничитель напряжения, радиационное облучение, коэффициент радиационного изменения времени жизни, кремниевая  $p^+nn^+$ -структура.

На основі експериментальних даних залежності часу життя неосновних носіїв заряду від радіаційного опромінення зроблено висновок, що залежність  $K_{\tau_0}/K_{\tau}(\Phi)$  від  $\rho(\Phi)/\rho(0)$  з високим ступенем вірогідності ( $R^2 = 0,96$ ) апроксимується прямою лінією й по суті вона дуже близька до відомої формули для часу життя неосновних носіїв заряду при великих концентраціях уловлювачів  $\tau_p = \tau_{p0}(1 + N_{cm}/n_0)$ . При цьому залежність  $K_{\tau}$  від флюенса нейтронів найімовірніше визначається зменшенням концентрації основних носіїв під впливом опромінення.

**Ключові слова:** обмежник напруги, радіаційне опромінення, коефіцієнт радіаційної зміни часу життя, кремнієва  $p^+nn^+$ -структура.

Based on experimental data of the dependence of the minority carrier lifetime from radiation exposure was concluded that the relationship  $K_{\tau_0}/K_{\tau}(\Phi)$  from  $\rho(\Phi)/\rho(0)$  with a high degree of confidence ( $R^2 = 0,96$ ) is approximated by a straight line and actually it is very close to the well-known formula for the lifetime of minority carriers at high concentration of traps  $\tau_{p0}(1 + N_{sm}/n_0)$ . The dependence of the  $K_{\tau}$  from neutron fluence probably is determined by decreasing the concentration of majority carriers under irradiation.

**Keywords:** transient voltage suppressor, radiation exposure, coefficient of radiation change in the lifetime, a silicon  $p^+nn^+$ -structure.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что напряжения пробоя  $p$ - $n$ -переходов силовых диодов могут слабо меняться даже при облучении большими флюенсами электронов, нейтронов и гамма-квантов [1]. Это особенно относится к полупроводниковым ограничителям напряжения (ОН) и стабилитронам, которые характеризуются еще двумя важными параметрами [2]:

– обратным током, который в режиме ожидания определяет энергетические потери в ОН;

– прямым падением напряжения, что особенно важно для симметричных стабилитронов и ОН, которые используются в цепях, где возможны выбросы напряжения обеих знаков.

Если напряжение пробоя и напряжение ограничения слабо зависят от времени жизни неосновных носителей заряда ( $\tau$ ), то обратный ток и прямое падение напряжения от  $\tau$  зависят весьма существенно [2 – 5]. Поэтому исследованию зависимости  $\tau$  от воздействия радиации и от флюенса нейтронов посвящено большое количество работ [5, 6].

В этих работах принимается, что:

$$1/\tau(\Phi) = 1/\tau(0) + K_{\tau}\Phi, \quad (1)$$

или:

$$\tau(0)/\tau(\Phi) = 1 + \tau(0)K_{\tau}\Phi, \quad (2)$$

где  $\tau(\Phi)$  – время жизни неосновных носителей заряда после воздействия флюенса нейтронов  $\Phi$ ;  $\tau(0)$  – время жизни неосновных носителей заряда до облучения;  $K_{\tau}$  – коэффи-

коэффициент радиационного изменения времени жизни в кремнии. В формулах (1) и (2)  $\tau(0)$  определяется концентрацией рекомбинационных центров  $N_{r\phi}$ , существующих в кремнии до облучения, а величина  $1/K_{\tau}\Phi$  является по сути временем жизни неосновных носителей заряда, которая определяется концентрацией рекомбинационных центров  $N_{r\phi}$ , вводимых облучением. При этом предполагается, что

$$N_{r\phi} \sim \Phi. \quad (3)$$

При определении величины  $K_{\tau}$ , необходимо обратить внимание на два обстоятельства:

– во-первых, большинство из них по своей сути посвящено экспериментальному или расчётному определению величины  $K_{\tau}$  и её зависимости от степени легирования полупроводника, от температуры, уровня инжекции и т.п. и

– во-вторых, ни один из авторов не приводит значения величин флюенса нейтронов, при котором получены опубликованные ими значения  $K_{\tau}$ . Формула (1) также не содержит явной зависимости  $K_{\tau}$  от флюенса. В то же время графическая зависимость формулы (1), приведённая в работе [7], свидетельствует о наличии зависимости  $K_{\tau} = f(\Phi)$ . Об этом же упоминают авторы работы [8]. Из работ [1, 5, 9], посвящённых расчёту и прогнозированию радиационной стойкости конкретных классов полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т.п.), следует, что в них возможная зависимость  $K_{\tau}$  от  $\Phi$  также не учитывается: обычно при расчётах используются либо экспериментальные значения  $K_{\tau}$ , либо его значение взятое из работы [6] для конкретных значений концентраций основных носителей и уровня инжекции. Подобный подход, по-видимому, вполне закономерен в тех случаях, когда необходимо произвести расчёт или оценку влияния сравнительно небольшого флюенса нейтронов на параметры приборов. Однако, применительно к ограничителям напряжения (или к стабилитронам), чья устойчивость к радиационному воздействию нейтронов достаточно велика, представляет интерес изучение зависимости  $K_{\tau} = f(\Phi)$  при больших флюенсах нейтронного облучения.

В настоящей работе коэффициент радиационного изменения времени жизни в кремнии исследуется в широком диапазоне нейтронного облучения на основе эксперимен-

тальной зависимости времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  от дозы облучения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ $p^+nn^+$ -СТРУКТУР

Исследуемые ОН изготовлены в ОАО «ФОТОН» на основе пакетного метода диффузии легирующих примесей [7]. В этом методе одновременно из двухсторон бор и фосфор содержащих источников осуществляется процесс диффузии на подложку кремния  $n$ -типа проводимости при температуре  $1250 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 45 часов. Толщина исходного кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\sim 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  составляет 200 мкм. В готовой  $p^+nn^+$ -структуре глубина диффузии бора – области  $p^+$ -типа составляет  $\sim 50 \pm 2 \text{ мм}$ , а глубина диффузии фосфора – области  $n^+$ -типа составляет  $\sim 55 \text{ мм}$ . Соответственно толщина базовой области равна 95 мкм. Сечение структуры, как показано на рис. 1а, в виде шестигранника с площадью  $\sim 9.3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ ; рис. 1а. На обе поверхности  $p^+nn^+$ -структуры с омическими контактами сформированы медные термокомпенсаторы сплавлением с помощью серебряного припоя ПСр 2.5, рис. 1б (двухслойная защита поверхности кристалла органическими материалами условно не показана). В полученных таким образом ограничительных диодах напряжения ограничения составляли  $U_{\text{ор}} = 200 \text{ В}$ .

Облучение этих образцов осуществлялось на исследовательском реакторе ИИН-3М. Флюенс нейтронов определялся по потоку нейтронов с энергией  $E \geq 100 \text{ кэВ}$ . Средняя энергия нейтронов при этом составляла  $\sim 1,5 \text{ МэВ}$ , а погрешность дозиметрии –  $\pm 20\%$ .

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИЕВЫХ $p^+nn^+$ -СТРУКТУРАХ

Для изучения зависимости  $K_{\tau} = f(\Phi)$  в данной работе экспериментально определялась зависимость времени восстановления обратного сопротивления ( $\tau_{rr}$ ) ОН от  $\Phi$ . Величина  $\tau_{rr}$  измерялась в режиме переключения ОН с пря-

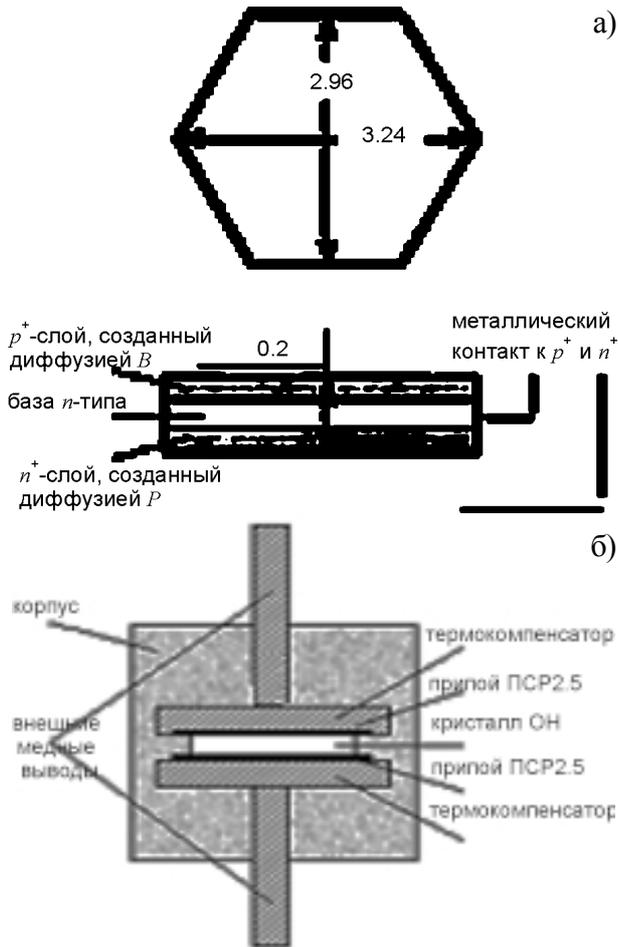


Рис. 1. Схематическое изображение кремниевой  $p^+nn^+$ -структуры диода (а) и (б) его конструкции.

мого тока  $I_F = (0.9 \pm 0.1)$  А на обратное напряжение 40 В при сопротивлении нагрузки 40 Ом. Режим переключения (величины прямого ( $I_F$ ) и обратного ( $I_R$ ) токов) определялся при каждом измерении величины  $\tau_{rr}$ . За величину  $\tau_{rr}$  принимался промежуток времени от момента перехода тока через нуль до момента, когда значение обратного тока снижается до 0.1 от своего максимального значения. По величине  $\tau_{rr}$  и соотношению  $I_F/I_R$  по графикам приведенным в работах [3, 10] определяли время жизни неосновных носителей заряда ( $\tau_p$ ) и его зависимость от флюенса нейтронов  $\Phi$ , а затем по формулам (1) или (2), определяли величину коэффициента  $K_\tau$  и его зависимость от  $\Phi$ . Точность измерения  $\tau_{rr}$  – составляла  $\pm 10\%$ .

Экспериментальные и расчётные зависимости, представленные на приведённых ниже рис. 2, 3, аппроксимировались кривыми, которые рассчитывались по методу наименьших квадратов, с обязательной оценкой достоверности аппроксимации ( $R^2$ ). На рис. 2

а) представлена экспериментальная зависимость  $\tau_p(\Phi = 0)/\tau_p(\Phi) = f(\Phi)$ , где ( $\tau_p(\Phi = 0)$  – время жизни неосновных носителей в базе ОН до облучения, равная  $\sim 240$  нсек. На основе данных приведенных на рис. 2 с помощью формулы (2) рассчитывались величины  $K_\tau$  (коэффициента радиационного изменения времени жизни) для заданных флюенсов нейтронов  $\Phi$ .

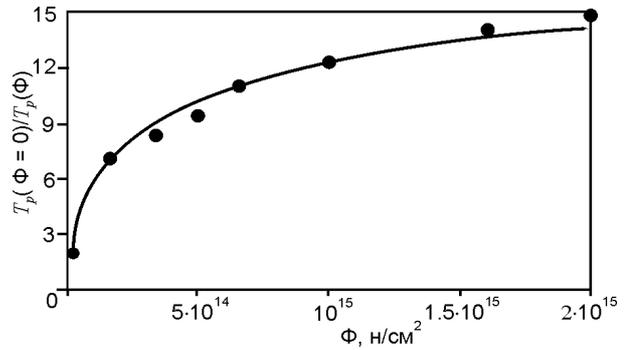


Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $\tau_p(\Phi = 0)/\tau_p(\Phi)$  от флюенса нейтронов.

Полученные данные в виде зависимости  $K_\tau(\Phi)/K_{\tau 0}$  от флюенса нейтронов приведены на рис. 3. В качестве  $K_{\tau 0}$  принято значение величины коэффициента радиационного изменения времени жизни в диапазоне значений флюенса нейтронов ( $10^{12} \div 2.5 \cdot 10^{13}$ ) н/см<sup>2</sup>, в которой эта величина постоянна и равна  $\sim 2.15 \cdot 10^{-7}$  н/см<sup>2</sup>.

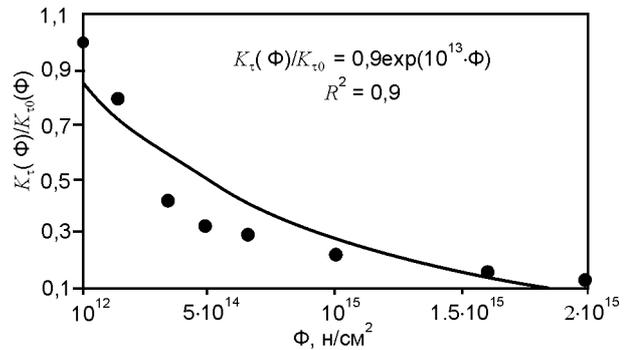


Рис. 3. Зависимость  $K_\tau(\Phi)/K_{\tau 0}$  от флюенса нейтронов.

Из рис. 3 следует, что  $K_\tau(\Phi)$  действительно зависит от  $\Phi$ . При этом, эта зависимость с достаточно хорошей достоверностью ( $R^2 \sim 0,9$ ) аппроксимируется экспоненциальной функцией.

Здесь следует отметить, что при допущении отсутствия взаимодействия существующих в исходном кремнии рекомбинационных центров  $N_r$  с радиационными рекомбинационными центрами  $N_{r\Phi}$ , вводимыми облуче-

нием, а также исключении возможности взаимодействия их между собой, получим нарушения условия (3). То есть практически единственным известным нам механизмом, который может формировать зависимость  $K_\tau(\Phi)$  является механизм, описанный Шокли, Ридом и Холлом, который допускает влияние положения уровня Ферми (или концентрации основных носителей) на время жизни неосновных носителей заряда. Действительно в процессе облучения кремния нейтронами уменьшается концентрация основных носителей заряда приводя к росту его удельного сопротивления ( $\rho$ ) [11]. При этом уровень Ферми смещается к середине запрещённой зоны. Наиболее подробно этот механизм применительно к глубоким уровням, которые вводятся в кремний нейтронным облучением, описан в работе [6]. Для того чтобы подтвердить (или опровергнуть) этот механизм формирования зависимости  $K_\tau$  от  $\Phi$ , достаточно проверить наличие функциональной связи между  $K_\tau(\Phi)$  и  $\rho(\Phi)$  в исследуемых образцах ОН.

Как показано в работе [11] и подтверждено многими другими авторами [12] при нейтронном облучении удельное сопротивление базы изменяется экспоненциально мощности облучения

$$\rho(\Phi) = \rho(0)\exp(K_p\Phi), \quad (4)$$

где  $\rho(0)$  – исходное удельное сопротивление кремния до облучения,  $K_p$  – коэффициент радиационного изменения удельного сопротивления кремния.

При подстановке экспериментального значения

$$K_p = 3.5 \cdot 10^{-16}(\rho(0))^{0.5}, \quad (5)$$

приведенного в работе [1] в заданном интервале флюенсов получим изменение удельного сопротивления от 2 Ом·см до 100 Ом·см. Для удельного сопротивления кремния  $\rho(0) = 2$  Ом·см, на котором были изготовлены исследуемые ОН этот коэффициент будет равен  $\sim 5 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>.

Зависимость  $K_{\tau_0}/K_\tau(\Phi)$  от  $\rho(\Phi)/\rho(0)$  (рис. 4), в которой использованы значения  $\rho(\Phi)$ , полученные расчетным путем с помощью (4) и (5) на основе экспериментальных данных  $\tau_p(\Phi)$  дает прямую линию, что тождественно зависимости времени жизни от концентрации носителей при нейтронном воздействии. Действительно приведенная на

рис. 4 зависимость с высокой степенью достоверности ( $R^2 = 0.96$ ) аппроксимируется прямой линией и равносильна известной формуле для времени жизни неосновных носителей заряда при больших концентрациях ловушек [13]:

$$\tau_p = \tau_{p0}(1 + N_{cm}/n_0). \quad (6)$$

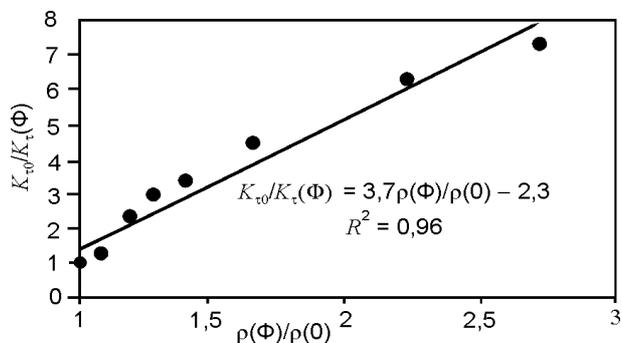


Рис. 4. Зависимость  $K_{\tau_0}/K_\tau(\Phi)$  от  $\rho(\Phi)/\rho(0)$ .

Это обстоятельство свидетельствует о том, что зависимость  $K_\tau$  от флюенса нейтронов вероятнее всего определяется уменьшением концентрации основных носителей под воздействием облучения. На основе данных зависимости  $K_\tau(\Phi)/K_{\tau_0}$  от флюенса нейтронов (рис. 3) с помощью формулы (5) можно получить следующую зависимость:

$$K_\tau(\Phi) = 0.9 \cdot K_{\tau_0} \exp(2K_p\Phi). \quad (7)$$

Полученную зависимость коэффициента изменения времени жизни неосновных носителей от коэффициента радиационного изменения удельного сопротивления кремния можно трактовать, как наличие связи между двумя фундаментальными величинами временем жизни неосновных носителей заряда и концентрацией носителей базовой области.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе анализа переходных процессов в кремниевой  $p^+nn^+$ -структуре можно заключить, что путем радиационного воздействия можно управлять параметрами базовой области и временными характеристиками.

## ЛИТЕРАТУРА

- Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. – М.: Советское радио, 1980. – 138 с.

2. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – М.: Энергия, 1967. – 164 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, книга 1. – М.: Мир, 1984. – 122 с.
4. Адирович Э.И., Карагергий-Алкалаев П.М., Лейдерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. – М.: Советское Радио, 1978. – 78 с.
5. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Атомиздат, 1969. – 143 с.
6. Messenger G.C.//Report on International Symposium on Radiation Effects in Semiconductors (Toulouse). – 1967.
7. Рахматов А.З., Муратов А.Ф., Меркулов А.А., Исмаилов Р.И. Способ изготовления ограничителей напряжения. – Патент № 25328, 1994, Бюл. № 23.
8. Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С., Кив А.Е., Нуров Ю.Л., Шаховцов В.И. Радиационные методы в твердотельной электронике. – М.: Радио и связь, 1990. – 59 с.
9. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. – Минск: Наука и техника, 1978. – 90 с.
10. Носов Ю.Р. Полупроводниковые импульсные диоды. – М.: Советское радио, 1964. – 61 с.
11. Buchler M.G.//Proc. IEEE. – 1968. – Vol. 56, No. 10. P. 111.
12. Коноплева Р.Ф., Новиков С.Р., Рубинова Э.Э. //ФТП. – 1969. – Т. 3. – С. 1119.
13. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: Физ.-мат. литер, 1963. – 156 с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shahovcov V.I. Dejstvie pronikayuschej radiacii na izdeliya elektronnoj tehniki. – М.: Sovetskoe radio, 1980. – 138 s.
2. Stepanenko I.P. Osnovy teorii tranzistorov i tranzistornyh shem. – М.: Energiya, 1967. – 164 s.
3. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov, kniga 1. – М.: Mir, 1984. – 122 s.
4. Adirovich E.I., Karagergij-Alkalaev P.M., Lejderman A. Yu. Toki dvojnoj inzhekcii v poluprovodnikah. – М.: Sovetskoe Radio, 1978. – 78 s.
5. Vavilov V.S., Uhin N.A. Radiacionnye efekty v poluprovodnikah i poluprovodnikovyh priborah. – М.: Atomizdat, 1969. – 143 s.
6. Messenger G.C.//Report on International Symposium on Radiation Effects in Semiconductors (Toulouse). – 1967.
7. Rahmatov A.Z., Muratov A.F., Merkulov A.A., Ismailov R.I. Sposob izgotovleniya ogranichitelej napryazheniya. – Patent № 25328, 1994, Byul. № 23.
8. Vavilov V.S., Gorin B.M., Danilin N.S., Kiv A.E., Nurov Yu.L., Shahovcov V.I. Radiacionnye metody v tverdotel'noj elektronike. – М.: Radio i svyaz, 1990. – 59 s.
9. Korshunov F.P., Gatalskij G.V., Ivanov G.M. Radiacionnye efekty v poluprovodnikovyh priborah. – Minsk: Nauka i tehnika, 1978. – 90 s.
10. Nosov Yu.R. Poluprovodnikovye impul'snye diody. – М.: Sovetskoe radio, 1964. – 61 s.
11. Buchler M.G.//Proc. IEEE. – 1968. – Vol. 56, No. 10. – P. 111.
12. Konopleva R.F., Novikov S.R., Rubinova E.E.//FTP. – 1969. – Т. 3. – S. 1119.
13. Ryvkin C.M. Foto'elektricheskie yavleniya v poluprovodnikah. – М.: Fiz.-mat. liter, 1963. – 156 s.