

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

А.З. Рахматов², А.В. Каримов¹

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

²ОАО “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_{τ} 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_{τ} 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_{τ} 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 (τ), то обратный ток и прямое падение напряжения от τ зависят весьма существенно [2 – 5]. Поэтому исследованию зависимости τ 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 Φ ; $\tau(0)$ – время жизни неосновных носителей заряда до облучения; K_{τ} – коэффи-

циент 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_{τ} , необходимо обратить внимание на два обстоятельства:

– во-первых, большинство из них по своей сути посвящено экспериментальному или расчётному определению величины K_{τ} 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_{τ} . Формула (1) также не содержит явной зависимости K_{τ} 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_{τ} от Φ также не учитывается: обычно при расчётах используются либо экспериментальные значения K_{τ} , 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 τ 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 (τ_{rr}) ОН от Φ . Величина τ_{rr} измерялась в режиме переключения ОН с пря-

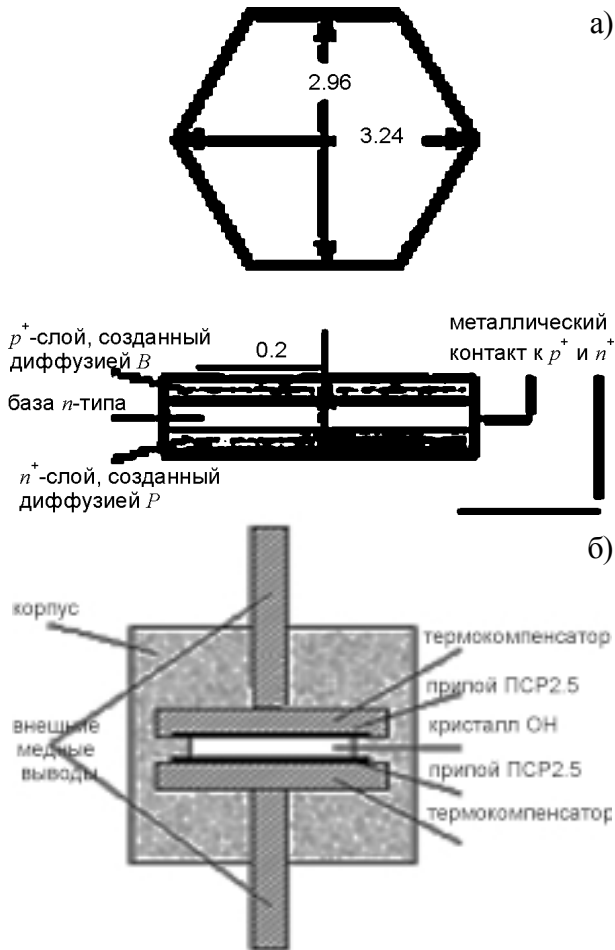


Рис. 1. Схематическое изображение кремниевой p^+nn^+ -структуры диода (а) и (б) его конструкции.

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 τ_{rr} . За величину τ_{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 τ_{rr} и соотношению I_F/I_R по графикам приведенным в работах [3, 10] определяли время жизни неосновных носителей заряда (τ_p) и его зависимость от флюенса нейтронов Φ , а затем по формулам (1) или (2), определяли величину коэффициента K_τ и его зависимость от Φ . Точность измерения τ_{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 ~ 240 нсек. На основе данных приведенных на рис. 2 с помощью формулы (2) рассчитывались величины K_τ (коэффициента радиационного изменения времени жизни) для заданных флюенсов нейтронов Φ .

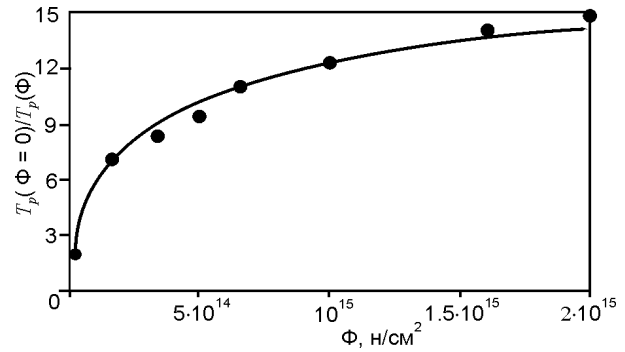


Рис. 2. Экспериментальная зависимость $\tau_p(\Phi = 0)/\tau_p(\Phi)$ от флюенса нейтронов.

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/см², в которой эта величина постоянна и равна $\sim 2.15 \cdot 10^{-7}$ н/см².

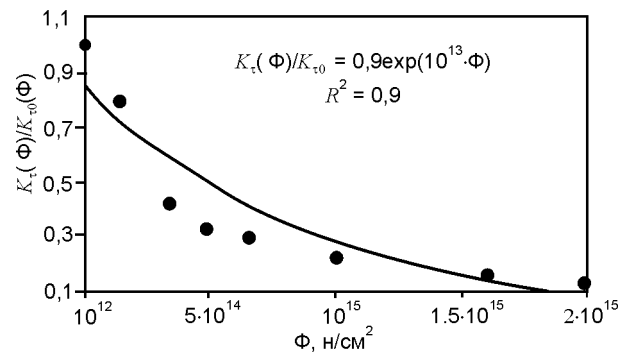


Рис. 3. Зависимость $K_\tau(\Phi)/K_{\tau 0}$ от флюенса нейтронов.

Из рис. 3 следует, что $K_\tau(\Phi)$ действительно зависит от Φ . 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 (ρ) [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_τ от Φ , 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/см².

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]:

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

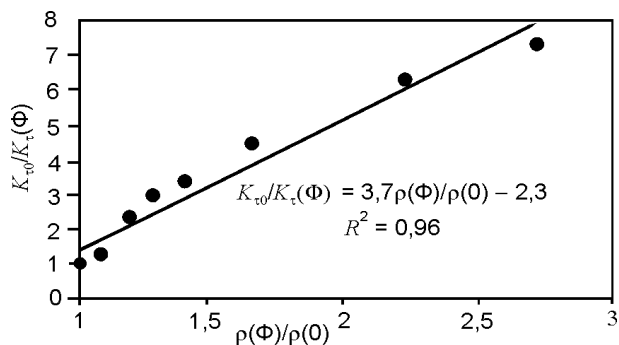


Рис. 4. Зависимость $K_{\tau_0}/K_\tau(\Phi)$ от $\rho(\Phi)/\rho(0)$.

Это обстоятельство свидетельствует о том, что зависимость K_τ 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.