

# Исследования релаксации избыточного тока кремниевых диодов Шоттки

© И.Г. Пашаев

Бакинский государственный университет  
AZ1148 Баку, Азербайджан

(Получена 9 января 2014 г. Принята к печати 26 марта 2014 г.)

Посвящена исследованию релаксации избыточного тока кремниевых  $\alpha$ -NiTi-*n*-Si диодов Шоттки, подвергнутых  $\gamma$ -облучению либо локальному нарушению структуры границы раздела с помощью алмазного индентора. Уменьшение избыточного тока диода достигалось как с помощью термоотжига, так и путем ультразвукового облучения. Параллельно исследовались параметры солнечных элементов, изготовленных из указанных диодов Шоттки, подвергнутых  $\gamma$ -облучению и однократному либо двукратному ультразвуковому облучению. Было показано, что после воздействия алмазным индентором избыточный ток диода уменьшен, путем термоотжига, однако уменьшение избыточного тока к исходной величине не достигается. Фотоэлектрические параметры исследованных солнечных элементов до облучения, после  $\gamma$ -облучения и однократного или двукратного ультразвукового облучения, показывают, что ультразвуковые обработки более эффективны, чем термоотжиг.

## 1. Введение

Увеличение надежности и улучшение качества электронных приборов, в том числе приборов на основе барьера Шоттки, остается настоящей потребностью современной полупроводниковой техники [1–3]. Как известно, при облучении полупроводниковых приборов заряженными частицами высоких энергий происходит накопление в объеме полупроводника радиационных центров, что приводит к существенному ухудшению электрофизических и фотоэлектрических характеристик приборов [4–6]. Традиционно, для восстановления нарушенных свойств облученных материалов применяют термическую обработку, использование которой приводит к некоторым негативным последствиям [7–8]. Поэтому в качестве альтернативы все чаще уделяется внимание атермическим способам обработки, одним из видов которых является УЗО. Ультразвуковое воздействие является эффективным способом повышения внутренней энергии твердых тел. В зависимости от коэффициента поглощения и от интенсивности ультразвука, возможны различные структурные изменения, оказывающие влияние на фотоэлектрические и электрофизические свойства материалов, а также на процесс пластической деформации [6,8,9].

Под воздействием некоторых внешних факторов при низких прямых напряжениях в диодах Шоттки (ДШ) и солнечных элементах (СЭ) могут появляться избыточные токи, что фиксируется по их вольт-амперным характеристикам (ВАХ) и является показателем релаксации избыточного тока ДШ и СЭ. Предполагается, что нарушенные участки ВАХ содержат ценную информацию, необходимую для установления истинной природы процессов, протекающих на границе раздела (ГР), и для механизма токопереноса в контакте металл–полупроводник (КМП) [5,6,9].

В связи с этим представляет интерес исследование релаксации избыточного тока кремниевых  $\alpha$ -NiTi-*n*-Si ДШ, подвергнутых локальному нарушению структуры границы раздела с помощью алмазного индентора, от времени отжига при различных значениях температуры отжига, одновременно изучены также параметры СЭ до облучения, после  $\gamma$ - облучения и однократного или двукратного ультразвукового облучения.

## 2. Экспериментальный процесс

Для изготовления ДШ и СЭ, которые изготовлены по технологии ДШ с прозрачным окном, использовали кремниевую пластину *n*-типа с ориентацией (111) и удельным сопротивлением  $0.7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Матрица содержала 14 диодов, площади которых менялись в интервале от 100 до  $1400 \text{ мкм}^2$ . В нашем случае площадь контакта ДШ была равна  $500 \text{ мкм}^2$ , толщина кремниевых пластин была  $280 \text{ мкм}$ , толщина пленки NiTi  $d_{\text{NiTi}} = 0.5 \text{ мкм}$ . Пленка освещается перпендикулярно к поверхности СЭ. Для напыления пленки металлического сплава  $\alpha$ -NiTi была использована промышленная установка „ОРАТОРИЯ-9“. Металлический сплав  $\alpha$ -NiTi наносили методом электронно-лучевого испарения из двух источников. Сплав Ni-Ti был выбран из тех соображений, что оба компонента широко применяются в микроэлектронике, а сам сплав технологичен. СЭ облучались  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  с дозой  $\sim 10^6$  рад при комнатной температуре. Затем эти образцы были последовательно, в два этапа, подвергнуты УЗО; продольная волна вводилась с тыльной стороны образца, перпендикулярно к его рабочей поверхности. На первом этапе, УЗО-1 (частота  $f_{\text{us}} \approx 95 \text{ МГц}$ , интенсивность  $W_{\text{us}} \approx 0.55 \text{ Вт/см}^2$ , продолжительность  $t \approx 120$  мин); на втором, УЗО-2, ( $f_{\text{us}} \approx 30 \text{ МГц}$ ,  $W_{\text{us}} \approx 15 \text{ Вт/см}^2$  и  $t \approx 200$  мин). После каждого этапа УЗО измерялись вольт-амперные характеристики в широком интервале температур (100–350 К)

† E-mail: islampashayev@rambler.ru

и вольт-фарадные характеристики СЭ. Из емкостных измерений определялись значения времени жизни неосновных носителей  $\tau_n$  и эффективной концентрации ионизированных центров  $N_{ef}$  [10,11].

Исследование релаксации избыточного тока ВАХ ДШ заключается в том, что она в нормальных условиях встречается нечасто, поэтому для подробного изучения указанных вопросов исследовали ВАХ ДШ, деградированного искусственно путем локального нарушения ГР [7,9]. С помощью микротвердомера ПМТ-3 создавали искусственным образом неоднородность на ГР контакта металл–полупроводник. Алмазная игла адаптера представляет собой правильную четырехугольную пирамиду с углом между противоположными гранями  $136^\circ$ . Площадь нарушенных участков варьировалась путем изменения величины нагрузки  $F(100\text{ g})$  и количества нарушений  $N(1)$  (рис. 1). После нарушения границы раздела величина тока, проходящего через диод, равна сумме токов, проходящих через нарушенные и не нарушенные участки. С увеличением механического давления  $F$  и  $N$  величина отношения токов линейно возрастает [9].

Термоотжиг диодов проводился при температурах  $100\text{--}400^\circ\text{C}$  в течение одинакового промежутка времени  $t = 20$  мин. Релаксации избыточного тока  $\alpha\text{-NiTi-n-Si}$  ДШ определялись от времени  $t$  (17–600 с) отжига, при различных температурах отжига — 200, 300,  $400^\circ\text{C}$ .

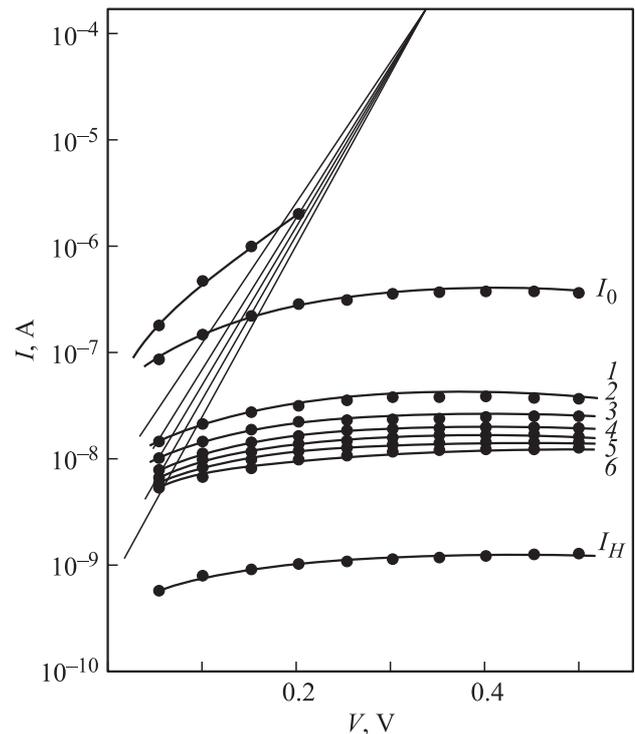
### 3. Результаты и их обсуждения

Для количественной характеристики релаксации избыточного тока с помощью термоотжига с учетом времени применялась формула

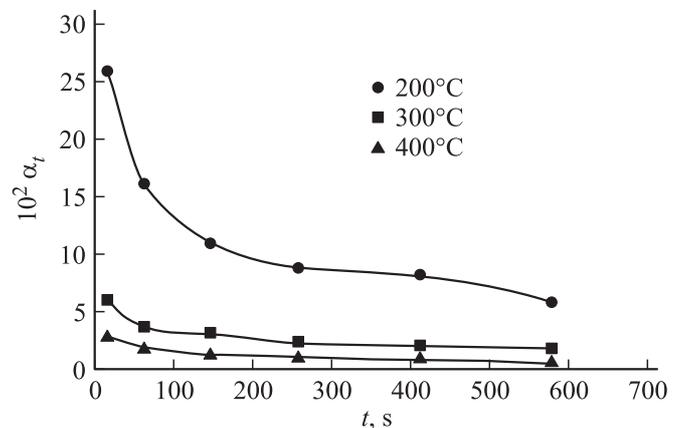
$$\alpha_t = \frac{I_t - I_n}{I_0 - I_n},$$

где  $I_n$  — ток нормального (неповрежденного) диода Шоттки,  $I_0$  — ток диода непосредственно после воздействия индентором ( $t = 0$ ),  $I_t$  — ток поврежденного диода, отожженного в течение  $t$  с,  $\alpha_t$  — характеристики релаксации избыточного тока под действием термоотжига за время  $t$ .

На рис. 1. представлены ВАХ для релаксации избыточного тока кремниевых  $\alpha\text{-NiTi-n-Si}$  ДШ, подвергнутых локальному нарушению структуры границы раздела с помощью алмазного индентора (под нагрузкой  $F(100\text{ g})$ , количество нарушений  $N = 1$ ) до и после отжига  $400^\circ\text{C}$  в течение определенного времени ( $1 - 17$ ,  $2 - 65$ ,  $3 - 148$ ,  $4 - 260$ ,  $5 - 410$ ,  $6 - 580$  с). Избыточный ток, возникающий в ДШ, проходит через механически нарушенные участки контакта вблизи границы раздела [9]. Исследование релаксации избыточного тока  $\alpha\text{-NiTi-n-Si}$  ДШ контролировалось методом снятия ВАХ как в прямом, так и в обратном направлениях. Для вычисления параметров использовали обратные ветви ВАХ.



**Рис. 1.** ВАХ деградационных свойств  $\alpha\text{-NiTi-n-Si}$  ДШ в  $I_H$  — нормальном,  $I_0$  — искусственно деградированном и отожженном ( $400^\circ\text{C}$ ) состоянии в течение  $t$ , с: 1 — 17, 2 — 65, 3 — 148, 4 — 260, 5 — 410, 6 — 580. При постоянном обратном токе  $V_{rev} = 0.2\text{ V}$ .



**Рис. 2.** Зависимость  $\alpha_t$  от времени отжига при различных значениях температуры отжига.

На рис. 2 представлена зависимость  $\alpha_t$  от времени отжига при различных значениях температуры отжига и при постоянном обратном токе  $V_{rev} = 0.2\text{ V}$ . Как показано на рис. 2,  $\alpha_t$  существенно зависит как от  $T_{ann}$ , так и от  $t$ . С изменением параметров отжига значение  $\alpha_t$  меняется в интервале  $0 \leq \alpha_t \leq 1$ . Из полученных результатов видно, что во-первых, основной этап процесса отжига происходит за короткие начальные промежутки времени, во-вторых, основной этап процесса отжига „из-

**Таблица 1.** Фотоэлектрические параметры  $\alpha$ -NiTi/Si образца СЭ до и после  $\gamma$ -облучения, а также после УЗО при  $P_l = 100 \text{ Вт/см}^2$  и  $T = 25^\circ \text{C}$

Состояние образца	Параметры				
	A	$U_{x.x.}$ , В	$I_c$ , мА	$P$ , мВт	$\xi$
До облучения	2.57	0.526	28.6	10.81	0.7186
После $\gamma$ -облучения	2.86	0.482	23.14	7.99	0.7161
После УЗО-1	2.77	0.505	24.62	8.92	0.7172
После УЗО-2	2.66	0.518	27.7	10.31	0.7189

**Таблица 2.** Электрофизические параметры  $\alpha$ -NiTi/Si образца СЭ до и после  $\gamma$ -облучения, а также после УЗО при  $P_l = 100 \text{ Вт/см}^2$  и  $T = 25^\circ \text{C}$

Состояние образца	Параметры				
	$N_{\text{эф}}$ , $\text{см}^{-3}$	$E_a$	$I_0$ , мкА	$L_n$ , мкм	$\tau_n$ , мкс
До облучения	$2.17 \cdot 10^{16}$	0.71	88.21	51.0	0.781
После $\gamma$ -облучения	$3.14 \cdot 10^{16}$	0.55	287.2	44.9	0.602
После УЗО-1	$2.92 \cdot 10^{16}$	0.61	276.1	48.5	0.703
После УЗО-2	$2.48 \cdot 10^{16}$	0.69	135.3	49.6	0.732

лечивает“ (характеристики релаксации, т.е. уменьшения избыточного тока при действии отжига) поврежденные диоды. ВАХ  $\alpha$ -NiTi- $n$ -Si ДШ очень чувствительна ко времени отжига. С течением времени даже при комнатной температуре, уровень избыточного тока уменьшается, т.е. как бы заживает „рана“, наносимая механическим повреждением. Процесс уменьшения избыточного тока происходит тем быстрее, чем выше температура и время отжига.

Параметры СЭ до и после соответствующих обработок приведены в табл. 1 и 2. Показано, что  $\gamma$ -облучение негативно сказывается как на обратной, так и на прямой ВАХ, ухудшая последние по сравнению с исходными (увеличение обратного тока  $I_{\text{rev}}$ ) [5,6,8].

Влияние  $\gamma$ -облучения и УЗО непосредственно на фотоэлектрические и электрофизические характеристики исследуемых СЭ видно из табл. 1 и 2, представлены параметры образца, СЭ которых определяются по известной формуле, известно, что величина фототока определяется из выражения [10]

$$I_\phi = qSN_\phi Q,$$

где  $q$  — заряд электрона,  $SN_\phi$  — общее количество фотогенерированных электронно-дырочных пар на площадке  $S$ ;  $Q$  — коэффициент собирания носителей заряда. Поскольку величина  $SN_\phi$  остается практически постоянной в условиях данного эксперимента, происходящее в результате  $\gamma$ -облучения падение фототока СЭ, очевидно, обусловлено уменьшением  $Q$ . Когда диффузионная длина неосновных носителей в базе  $L_n \ll d_p$ , величина  $Q$

определяется из [10,11]

$$Q = \frac{\alpha L_n}{\alpha L_n + 1}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения света.

Известно, что  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ , где  $D_n$  — коэффициент диффузии,  $\tau_n$  — время жизни неосновных носителей в базе.

Учитывая (1), для фототока получаем следующее выражение:

$$I_\phi = qSN_c \frac{\delta \sqrt{D_n \phi_n}}{\delta \sqrt{D_n \phi_n} + 1}.$$

Напряжение холостого хода  $U_{x.x.}$  определяется как

$$U_{x.x.} = \frac{AkT}{q} \ln \left( \frac{I_{cz}}{I_{0ob}} \right) \quad (2)$$

( $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $I_{cz}$  — ток короткого замыкания,  $U_{x.x.}$  — напряжение холостого хода,  $A$  — безразмерный коэффициент,  $P_{\text{max}}$  — максимальная выходная мощность,  $\xi$  — коэффициент заполнения и электрофизические,  $\tau_n$  — коэффициент диффузии и время жизни неосновных носителей,  $L_n$  — диффузионная длина неосновных носителей,  $I_{0r}$  — обратный ток насыщения,  $N_{\text{эф}}$  — эффективная концентрация ионизированных центров,  $E_a$  — энергия активации), что проявляется в уменьшении тока короткого замыкания  $I_{cz}$  и напряжении холостого хода  $U_{x.x.}$  и, как следствие, в снижении максимальной выходной мощности  $P_{\text{max}}$ . Последующие УЗО-1 и особенно УЗО-2 восстанавливают параметры СЭ, приближая их к исходным. Облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  с энергией порядка  $\sim 1.35 \text{ МэВ}$  эквивалентно внутреннему облучению СЭ быстрыми электронами, возникающими в результате комптоновского рассеяния и фотопоглощения, и приводит в основном к образованию дефектов точечного типа. Проведенные в два этапа, УЗО-1 и особенно УЗО-2, исследования кремниевых СЭ привели к понижению  $N_{\text{эф}}$  (табл. 2), что свидетельствует об атермическом отжиге радиационных центров. Как известно, отжигу радиационных центров может соответствовать несколько механизмов: миграция дефектов на стоки [4–6,9,11], образование более сложного дефекта, диссоциация комплекса и др.

Таким образом, воздействие УЗО является эффективным способом повышения внутренней энергии твердых тел. В отличие от тепловой энергии, поглощаемой равномерно во всем объеме полупроводника, затухание УЗО волн происходит, в основном, на дефектах кристаллической решетки, способствуя их перераспределению к равновесному состоянию [5,7].

## 4. Заключение

Выявлено, что релаксация деградации вследствие термических и ультразвуковых обработок  $\alpha$ -NiTi- $n$ -Si ДШ

связана с изменением параметров отжига, в данной работе его значение меняется в интервале  $0 \leq \alpha_t \leq 1$ , основной этап процесса отжига „излечивает“ поврежденные диоды. Одновременно рассмотрены экспериментальные результаты, доказывающие возможность восстановления и управления параметрами кремниевых СЭ с помощью УЗО. Восстановление исходных электрофизических и фотоэлектрических свойств СЭ, нарушенных  $\gamma$ -облучением, с помощью УЗО связано с перегруппировкой и атермическим отжигом радиационных центров, образованных  $\gamma$ -квантами.

## Список литературы

- [1] К.Т.У. Kung, I. Suni, М.А. Nikolet. J. Appl. Phys. **55**, 10 (1984).
- [2] Н.А. Торхов, В.А. Новиков. ФТП, **43** (8), 1116 (2009).
- [3] И.Г. Пашаев. ФТП, **47** (6), 761 (2013).
- [4] В.Л. Августимов, Т.Н. Белоусова, С.И. Власкина. ОПТ. № 30, 120 (1995).
- [5] И.В. Островский, Л.П. Стебленко, А.Б. Надточий. ФТП, **34** (3), 257 (2000).
- [6] И.Б. Ермолович, В.В. Миленин, Р.В. Конакова. ПЖТФ, **22** (6), 33 (1996).
- [7] И.Г. Пашаев. ФТП, **46** (8), 1108 (2012).
- [8] П.Б. Парчинский, С.И. Власов, Л.Г. Лигай. Письма ЖТФ, **29** (9), 83 (2003).
- [9] Т.В. Критская, И.Г. Пашаев. Науч. тр. ЗГИА „Металлургия“ (Запорожье), **3** (28), 138 (2012).
- [10] Т.Дж. Коутс, Дж.Д. Микин. Современные проблемы полупроводниковой фотоэнергетики (М., Мир, 1988) с. 307.
- [11] А.Н. Гонтарук, Д.В. Корбутяк, Е.В. Корбут. Письма ЖТФ, **24** (15), 64 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

## Excess current silicon Schottky diodes relaxation investigation

*I.G. Pashaev*

The Baku State University,  
AZ1148 Baku, Azerbaijan

**Abstract** This paper deals with the relaxation of the excess current silicon  $\alpha$ -NiTi-*n*-Si Schottky diodes (ShD), subjected to  $\gamma$ -irradiation or local disruption of the interface structure with a diamond indenter. Reduction of excess diode current was achieved both with thermal annealing and ultrasonic irradiation. Parallel trial assessed the solar cells made from these ShD exposed to  $\gamma$ -radiation and single  $\gamma$ -or two-time ultrasonic irradiation. It was shown that after exposure to diamond indenter excess diode current is reduced by thermal annealing, but the reduction of the excess current to the original value is not achieved. The parameters of the photovoltaic solar cells before irradiation, after  $\gamma$  irradiation and a single or double ultrasonic irradiation show that the ultrasonic treatment is more effective than thermal annealing.