

# ВЛИЯНИЕ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ НИКЕЛЯ НА ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КРЕМНИЕВЫХ $p^+$ - $n$ ПЕРЕХОДОВ

Э.С. ТАПТЫГОВ, Э.А. ДЖАФАРОВА, Ш.А. АЛИХАНОВА, А.А. БАЙРАМОВ

*Институт Физики АН Азербайджана,*

*Баку, 370143, пр. Г. Джавида, 33*

Исследовано влияние примеси никеля в Si на электрические свойства высоковольтных  $p^+$ - $n$  переходов. Показано, что при высоких концентрациях никеля наблюдается преципитация междоузельных атомов никеля, что приводит к смягчению обратной ветви вольтамперной характеристики; при малых концентрациях никеля наблюдается немонотонная температурная зависимость напряжения пробоя  $p^+$ - $n$  перехода, связанная с перезарядкой глубоких уровней никеля в слое объемного заряда.

## 1. Введение

В настоящее время для изготовления приборов с заданными электрическими свойствами используются примеси с глубокими уровнями (ГУ) в запрещенной зоне. Одной из примесей, широко применяющейся в полупроводниковой электронике, является никель. Проникая в объем кремниевой пластины в процессе высокотемпературной диффузии, атомы никеля располагаются в междоузлиях в нейтральном состоянии. В зависимости от условий обработки ( $T_{\text{дифф}}$ , скорость охлаждения) определенная часть атомов ( $\sim 0,1\%$ ) может занять вакантные узлы решетки, проявляя при этом электрическую активность [1]. Максимальная концентрация электроактивных атомов никеля в узлах (при данной  $T_{\text{дифф}}$ ) достигается при резком охлаждении (закалке) образцов после высокотемпературной обработки. При высоких концентрациях введенного никеля возможно также скапливание междоузельных атомов в преципитаты больших размеров [2]. В [3] показано, что глубокие уровни примеси золота приводят к снижению напряжения пробоя  $p^+$ - $n$  диодов. В [4] на примере золота и меди рассмотрен другой эффект влияния примеси на обратные ВАХ диодов. В [5] исследовалось влияние ГУ термических дефектов на пробивное напряжение ( $U_{\text{пр}}$ ) высоковольтных диодов на базе  $n$ -Si. Установлено, что возникающие во время высокотемпературной диффузии ГУ существенно изменяют  $U_{\text{пр}}$ , приводя к немонотонной зависимости  $U_{\text{пр}}$  от температуры. Максимальная концентрация термических дефектов при этом составила  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Из-за малого сечения  $\approx 10^{-20} \text{ см}^2$  эти ГУ почти не влияли на время жизни неосновных носителей. Опираясь на то, что напряжение пробоя диодов равно

$$U_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_a E_{\text{пр}}^2}{2qN_I}$$

и в общем случае зависит от концентрации ионизованных уровней в  $\text{CO}_3$ , где  $N_I = N_M + N_T$ , авторы связали данное явление с перезарядкой глубоких уровней термических дефектов в  $\text{CO}_3$ .

Целью данной работы является исследование влияния различных состояний примеси никеля в кремнии на пробивное напряжение высоковольтных диодов.

## 2. Образцы и методы измерения.

Исходные структуры были изготовлены диффузией бора в  $n$ -Si, выращенный методом Чохральского с удельным сопротивлением  $\rho = 5$  и  $50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Полученные  $p$ - $n$  переходы имели "жесткие" обратные характеристики с четко выраженным участком лавинного пробоя объемного характера и временем жизни неосновных носителей  $\tau = 30\text{--}40 \text{ мкс}$ . Объемный характер пробоя контролировался с помощью лазерного сканирующего микроскопа [6]. Введение никеля в  $p$ - $n$  переход осуществлялось диффузионным способом из напыленного на одну из сторон пластины металлического никеля. Готовые структуры с никелем, а также контрольные без никеля имели форму диска площадью  $\sim 1,0\text{--}1,5 \text{ см}^2$ , с торцов которых были сняты фаски с последующим травлением в  $\text{CP-4}$  [7]. Спектр ГУ контрольных и легированных никелем образцов снимали с помощью метода нестационарной емкостной спектроскопии (НЕСГУ) [8]. Концентрацию мелких  $N_M$  и глубоких  $N_T$  уровней определяли из измерений вольтфарадных характеристик (ВАХ) при соответствующих температурах.  $U_{\text{пр}}$  в интервале  $77\text{--}300 \text{ К}$  измеряли с помощью импульсов напряжения синусоидальной формы длительностью  $10 \text{ мс}$  с частотой повторения  $\sim 1 \text{ Гц}$ . Объемное распределение атомов никеля в диодах наблюдалось с помощью инфракрасного микроскопа МИК-4.

## 3. Результаты измерений и обсуждения.

Измерения проводились на диодах двух партий, отличающихся содержанием примеси никеля. Диоды I партии, с большим содержанием никеля, были изготовлены из  $n$ -Si с  $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , а диоды II партии, с малым содержанием никеля - из  $n$ -Si с  $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Введение необходимой концентрации никеля осуществлялось подбором  $T_{\text{дифф}}$ . Концентрации мелкой и глубокой примеси для диодов I и II партии приведены в таблице.

Таблица.

Партия	$\rho$ исходное	$N_M, \text{ см}^{-3}$	$N_T(\text{A}), \text{ см}^{-3}$	$N_T(\text{B}), \text{ см}^{-3}$
I	5 Ом	$9,9 \div 10^{14}$	$5 \div 10^{13}$	$2 \div 10^{14}$
II	50 Ом	$9,8 \div 10^{13}$	$9,6 \div 10^{12}$	$8 \div 10^{12}$

Спектры НЕСГУ диодов, легированных никелем I и II партии, приведены на рисунке (кривая 1). На спектрах видны два пика, соответствующие ГУ никеля с энергиями

ионизации  $E_i(A) = E_c - 0,20$  и  $E_i(B) = E_c - 0,41$  эВ, соответственно [9].

Диоды I партии с  $N_r \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup> имели "мягкие" обратные ВАХ. Зависимость  $I_{обр} = f(U_{обр})$  имела степенной характер с коэффициентом  $\gamma = 3$ , что свидетельствует о плавном распределении примеси в СОЗ. Значение энергии активации  $\Delta E$  уровня, ответственного за генерацию, определенное из температурной зависимости тока при различных  $U_{обр}$ , лежит в интервале 0,15-0,26 эВ.  $\Delta E$ , определенная также из температурной зависимости времени жизни неосновных носителей, составила  $\sim 0,14$  эВ.

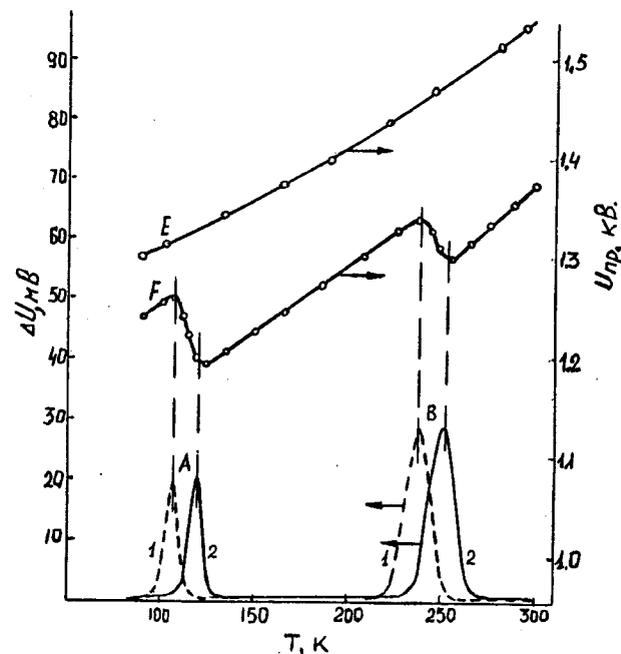


Рис. Температурная зависимость  $U_{пр}$  p<sup>+</sup>-n переходов (E-контрольного, F- с малым содержанием никеля) и спектры НЕСГУ диодов с никелем при разных  $\theta_m$  (1 -  $\theta_m = 91$  мс, 2 -  $\theta_m = 1,82$  мс).

Как видно, найденные значения энергии активации не совпадают с  $E_i$  для ГУ никеля, полученных из НЕСГУ измерений. Как было указано выше, при больших концентрациях никель способен скапливаться в преципитаты. Причем размеры и количество их зависит не только от концентрации примеси, но и от скорости охлаждения после ВТО. Действительно, в диодах I партии с мягкой обратной ВАХ с помощью ИК микроскопа были

обнаружены преципитаты никеля размером до 10 мкм. В диодах II партии с  $N_r \sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup> наблюдались резкие обратные ВАХ с выраженным участком лавинного пробоя.  $U_{пр}$  контрольных образцов данной партии монотонно растет с температурой (кривая E), что связано с увеличением  $E_{кр}$  при изменении длины свободного пробега носителей тока [10]. Однако, температурная зависимость  $U_{пр}$  диодов с никелем немонотонна (кривая F). При сравнении этой кривой со спектрами НЕСГУ можно заметить, что участки уменьшения  $U_{пр}$  с ростом  $T$  совпадают с температурным диапазоном перезарядки ГУ А и В. Приведенные на рисунке спектры НЕСГУ никеля сняты для двух окон стробирования, при которых  $\theta_m = 91$  и 1,82 мс, соответственно (кривые 1 и 2). Видно, что начало уменьшения  $U_{пр}$  от  $T$  совпадает с максимумом пиков на кривой 1, а конец - с максимумом пиков на кривой 2. Если учесть, что ионизация ГУ происходит по закону  $N^+ = N_r [1 - \exp(-\tau/\theta)]$  [8], где  $\tau$  - интервал времени нарастания обратного смещения до величины  $U_{пр}$ ,  $\theta$  - постоянная времени перезарядки ГУ в максимуме пиков, то концентрация ионизованной глубокой примеси зависит, в общем случае, от соотношения  $\tau/\theta$ . Для принятых в нашем эксперименте значений  $\sim 5$  мс  $N^+ = N_r \approx 0,05$  при  $\theta_m = 91$  мс и  $N^+ = N_r \approx 0,95$  при  $\theta_m = 1,82$  мс.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что характер изменения  $U_{пр}$  высоковольтных p-n переходов зависит от особенностей в поведении примеси никеля. При высоких концентрациях никеля, образующиеся в большом количестве, преципитаты приводят к смягчению обратных ВАХ диодов. Смягчение обратных ВАХ диодов может быть результатом сильного нарушения однородности электрического поля в СОЗ преципитатами никеля. Вклад генерационного тока через ГУ никеля незначителен. При малых концентрациях никеля образование междоузельных преципитатов незначительно и диоды имеют хорошую обратную ВАХ с выраженным участком лавинного пробоя. Однако наличие в СОЗ ГУ никеля приводит к немотонной температурной зависимости  $U_{пр}$ , связанной с перезарядкой ГУ никеля. При этом следует учитывать, что пробой происходит в локальных областях диода с максимальной эффективной концентрацией ионизованных центров, что может быть обусловлено присутствием примеси с ГУ [11].

[1] Б.И. Болтакс, М.К. Бахадирханов, С.М. Городецкий, Г.С. Куликов. Компенсированный кремний. Л. Наука, 1973, с.122.  
 [2] М.К. Бахадирханов, С. Зайнабидинов. ФТП, 1978, т. 12, в.4, с.683-688.  
 [3] А. Милнс. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М. Мир, 1977, с.562.  
 [4] Т. Ogawa. Japan Jour. Appl. Phys. 1966, n.5, p.145.  
 [5] Е.В. Астрова и др. ФТП, т.28, в.11, 1994, с.2122-2125.  
 [6] В.М. Волле и др. Автоматизированный электроприбор, силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. М., 1983, с.304-309.

[7] Ю.А. Евсеев. Полупроводниковые приборы для мощных высоковольтных преобразовательных устройств. М., Энергия, 1978, с. 193.  
 [8] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981, с. 176.  
 [9] А.А. Лебедев, Э.С. Таптыгов, Э.А. Джафарова. Препринт ФТИ-1172, Ленинград, 1990, с. 11.  
 [10] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. т. 1, М., 1984, с. 456.  
 [11] Г.В. Акимов и др. ФТП, 1975, т.9, в.4, с.764-767.

**E.S. Taptygov, E.Ə. Cəfərova, S.Ə. Əlixanova, A.A. Bayramov**

**NIKEL ATOMLARININ YARATDIĞI DƏRİN SƏVIYYƏLƏRİN YÜKSƏK GƏRGİNLİKLİ SİLİSIUM p<sup>+</sup>-n  
KEÇİDLƏRİN DEŞİCİ GƏRGİNLİYƏ TƏ'SİRİ**

Nikel aşqarının yüksək gərginlikli silisium p<sup>+</sup>-n keçidlərinin elektrik xassələrinə təsiri tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, nikelin konsentrasiyası yüksək olduqda nikel atomları qəfəsin düyünləri arasında yerləşir, bu da volt-ampere xarakteristikasının əks istiqamətdə yumşalmasına səbəb olur. Nikelin konsentrasiyası aşağı olduqda isə p-n keçiddə gərginliyin temperaturdan asılılığında qeyri-monotonluq və deşilmə müşahidə olunur. Bu isə yüklənmiş təbəqələrdə nikelin dərin səviyyələrinin yenidən yüklənməsi ilə əlaqədardır.

**E.S. Taptygov, E.A. Jafarova, Sh.A. Alihanova, A.A. Bayramov**

**INFLUENCE OF DEEP LEVELS OF Ni ON THE BREAKDOWN VOLTAGE OF HIGH  
VOLTAGE SILICON p<sup>+</sup>-n JUNCTION**

An investigation has been made of the effect of nickel impurity in silicon on the breakdown voltage of high-voltage diodes. At high concentrations of nickel the precipitates formed in concentrations of nickel nonmonotone temperature dependence of the breakdown voltage due to charge exchange of nickel deep levels in the space charge layer has been observed.

*Дата поступления: 14.09.98*

*Редактор: З.И. Искендеозаде*