

**Клочков Анатолий Яковлевич,**  
к.т.н., доцент,  
ФГБОУ ВО РГАТУ, г.Рязань, РФ

**Левина Татьяна Анатольевна,**  
к.э.н., доцент, зав. Кафедрой,  
ФГБОУ ВО Мосполитех, г.Москва, РФ

**Глухих Яков Михайлович,** студент,  
ФГБОУ ВО Мосполитех, г.Москва, РФ

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ШИН

**Аннотация.** Сейчас появляется новое диагностическое оборудование способное прогнозировать качество и долговечность датчиков применяемых в технике. При этом показатели технической стабильности и надёжности производственного и технологического оборудования увеличиваются.

Нами также проведены исследования глубоких центров в электронных структурах после воздействия на них внешних факторов, т.е. на датчики, использованные в сельскохозяйственной технике. Концентрации дефектов в полупроводниковых структурах датчиков, создающие глубокие центры значительно снизились до технических характеристик во время заводских сертификационных испытаний. Результаты испытаний характеристик этих сенсоров в соответствии с техническими условиями их использования показали, что их параметры восстановились до заводских характеристик. Таким образом, можно восстанавливать электронные датчики путём воздействия дополнительных факторов.

**Ключевые слова:** датчики Холла, диоды Шоттки, релаксация фотопроводимости, полупроводники, эффект Френкеля-Пула, сенсоры, дефекты

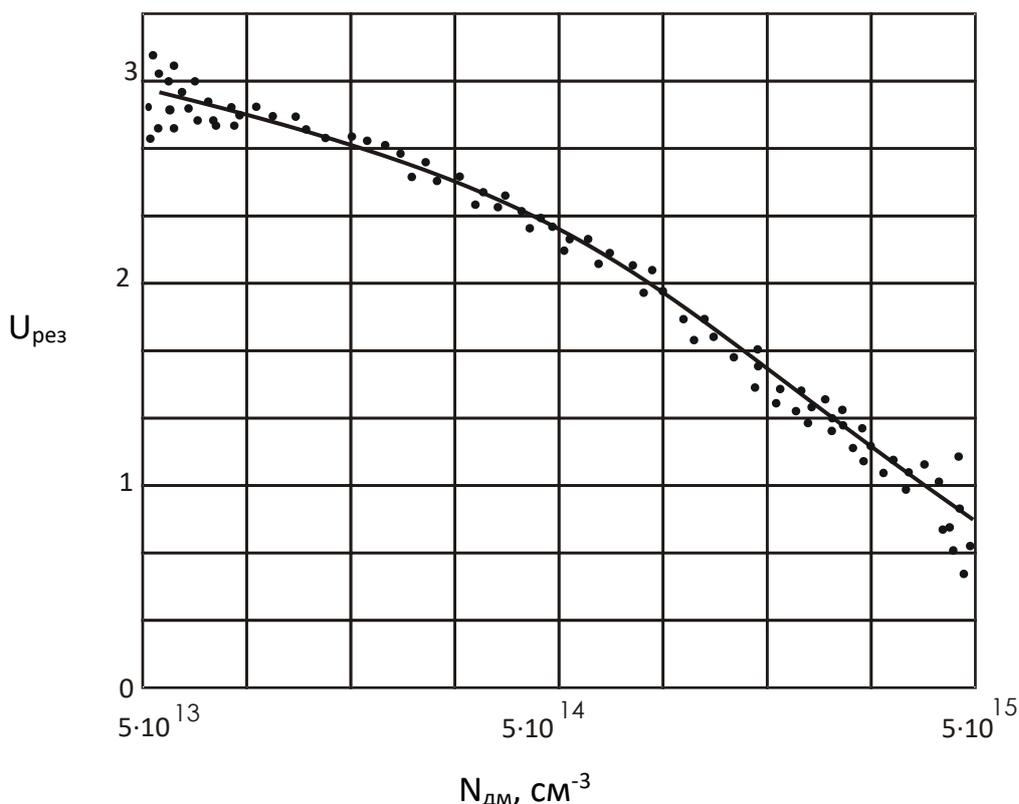
В условиях импортозамещения сельскохозяйственной техники и активного соответственно увеличения уровня автоматизации оборудования. Появляется новое диагностическое оборудование способное прогнозировать качество и долговечность датчиков применяемых в технике. При этом показатели технической стабильности и надёжности производственного и технологического оборудования увеличиваются [1-3]. Для активации путей повышения стабильности и надёжности технических средств контроля необходимо стабилизировать электронную и элементную базу датчиков управления техники, в частности датчиков Холла. Полупроводниковые датчики, в основе которых являются диоды Шоттки, положены широко известные в частности структуры Al-Si(n) имеющие явные преимущества, как при производстве, так и при эксплуатации этих датчиков применяемых широко в сельскохозяйственной технике. Возможность управлять качеством подобных структур этих датчиков малыми внешними воздействиями и напряжениями экономически упрощает технически надёжность датчика и повышает их срок службы. Изучению полупроводниковых структур этих датчиков и посвящено данное исследование.

В ходе исследований DLTS-спектров и долговременной релаксации фотопроводимости [4-8] в полупроводниковых слоистых структурах наблюдалась полевая зависимость постоянной времени перезарядки ГУ  $\tau$  на образцах, представляющих собой Al-Si(n) диоды Шоттки с разными значениями концентрации мелких доноров ( $N_{DM}$ ) в базе. Полевые зависимости  $\tau$  наблюдались для ГЦ с  $\Delta E$ , лежащими в широком диапазоне энергий (от 0,20 эВ до 0,55 эВ). При анализе релаксации полевых зависимостей, то есть  $\tau(U_{обр.})$ , оказалось, что прямые типа Аррениуса смещались параллельно, без изменения наклона. Это говорит о том, что мы имеем дело не с группой ГУ, включающимися центров в работу с



ростом  $U$ , а с одним уровнем. Полевые зависимости наблюдались для структур в широком диапазоне  $N_{\text{дм}}$ . Значение  $N_{\text{дм}}$  изменялось от  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , это соответствовало изменению  $\rho$  от  $80 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  до  $0,8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Зависимость  $U_{\text{рез}}$  от  $N_{\text{дм}}$  представлена на рис.1. Этот график построен по результатам измерений полевых зависимостей  $\tau$  на 72 Al-Si(n) диодах Шоттки методами DLTS. Следует отметить, что для диодов Шоттки с разными концентрациями  $N_{\text{дм}}$  (в базе) были разные значения напряжения резонанса  $U_{\text{рез}}$ . Напомним, что  $U_{\text{рез}}$  – это такое значение  $U$ , при котором достигается насыщение пролета носителей с ГУ через ОПЗ, то есть когда все носители выносятся полем, и этот процесс преобладает над рассеянием и захватом в ОПЗ. В ходе исследований отмечалось, что с ростом  $N_{\text{дм}}$  (с уменьшением  $\rho$ ) в указанных пределах происходит снижение  $U_{\text{рез}}$ . Такая зависимость не противоречит активационно–пролетной теории. Из графика видно, что с уменьшением  $N_{\text{дм}}$  от  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (при этом  $\rho$  изменяется от  $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  до  $40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) происходит довольно быстрый рост  $U_{\text{рез}}$ .



**Рис. 1. Зависимость  $U_{\text{рез}}$  от  $N_{\text{дм}}$  для диодов Шоттки Al-Si(n)**

Очевидно, зависимость  $U_{\text{рез.}} = f(N_{\text{дм}})$  подтверждает активационно-пролётную модель для описания релаксации ГУ в барьерном слое, так как с уменьшением  $N_{\text{дм}}$  возрастает толщина ОПЗ и, следовательно, увеличивается время пролёта сквозь этот физический барьерный слой. В этом случае для достижения пролётной компоненты нужно прикладывать всё большее напряжения опустошения. Из рисунка 1. видно, что по мере снижения концентрации мелкой легирующей примеси ( $N_{\text{м}}$ ) темп роста  $U_{\text{рез}}$  несколько снижается. Эта кривая удовлетворительно объясняется с точки зрения активационно-пролётной модели: то есть с ростом  $\rho$  (снижение  $N_{\text{м}}$ ) растёт ширина ОПЗ ( $w$ );  $w = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_0+V_k)}{eN_{\text{м}}}}$ ; откуда  $N_{\text{м}} = \frac{2\epsilon\epsilon_0(V_0+V_k)}{ew^2}$ . По активационно-пролётной теории рост  $w$  с уменьшением  $N_{\text{м}}$  приводит к тому, что время пролёта носителей через ОПЗ увеличивается и резонанс достигается при больших значениях  $U$ , достигая критического значения поля  $E(x)$ . Однако с ростом поля  $E(x)$  начинает, по-



видимому, для большинства образцов проявляться эффект Френкеля-Пула. За счёт этого эффекта после достижения  $U_{рез.}$  прямые Аррениуса в зависимости от  $U_{обр.}$  становятся не параллельны, а зависимость  $\tau = f(U)$  будет иметь отрицательную производную по  $U$  [4-6].

Известно, что эффект Френкеля-Пула состоит в понижении потенциального барьера для электрона, покидающего ловушку на величину

$$\Delta E_F = \left( \frac{e^3}{\pi \epsilon \epsilon_0} \right)^{1/2} \cdot F^{1/2} \quad (1)$$

Формула (1) работает, если при уходе электрона ловушка приобретает заряд. Однако если электрон уходит с отрицательно заряженной ловушки, и она при этом остаётся нейтральной, высота потенциального барьера тоже снижается:

$$\Delta E_F = -2(nU_0 F^n)^{1/(n+1)}, \quad (2)$$

где  $U_0$  – кулоновский потенциал притяжения нейтральной ловушки. Таким образом, с ростом поля энергия активации  $\Delta E$  ловушки снижается за счёт эффекта Френкеля-Пула:

$$n_i = A \cdot e^{-\frac{\Delta E_t - \Delta E_F}{2kT}}, \quad (3)$$

где  $n_i$  – концентрация носителей, возникающая за счёт ионизации ГУ;  $A$  – постоянная;  $\Delta E_t$  – энергия активации ГУ;  $\Delta E_F$  – понижение барьера за счёт эффекта Френкеля-Пула. Согласно (3) эффект Френкеля-Пула должен проявляться при полях  $10^2$ - $10^3$  В/см. На опыте установлено, что он проявляется при гораздо более сильных полях:  $5 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^4$  В/см; и даже  $10^3$ - $10^5$  В/см – вторая группа цифр приведена для нейтральных ловушек. Основная причина таких расхождений заключается в том, что ход потенциала вблизи примесного атома экранирован электронами. Вследствие этого эффект поля будет слабее. Кроме того, здесь больше влияние оказывает зарядовое состояние центра и концентрация ГЦ [4].

Увеличение напряженности поля вызывает изменение энергии, и найденное экспериментально значение может, отличается от расчетного значения. Это связано с тем, что при больших полях существенную роль играют эффекты, неучтённые классической теорией: ускорение эмиссии электрическим полем и туннелирование. Однако следует помнить, что неравномерное распределение глубоких центров, участвующих в генерации, может вызвать отклонения ВАХ от теоретической. Учёт эффекта Френкеля- Пула позволяет объяснить увеличение тока на начальном участке ВАХ [5,9].

В тоже время, для структур с  $\rho$ , изменяющихся в пределах от 0,5 Ом·см до 4,5 Ом·см наблюдается полевая зависимость, описываемая активационно-дрейфовой моделью, т.е. эффект Френкеля-Пула не достигается. Здесь измерения проводятся при напряженности поля  $10^3$ - $10^5$  В/см. С дальнейшим ростом поля при  $U > U_{рез.}$  начинает проявляться эффект Френкеля-Пула. Возрастание разброса точек на графике рис.1. (в диапазоне концентраций легирующей примеси от  $5 \cdot 10^{14}$  до  $7,5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>) крайней его левой части, по-видимому, обусловлен началом работы эффекта Френкеля-Пула. Этот эффект замедляет также некоторое снижение темпа роста  $U_{рез.}$  при снижении  $N_{дм}$  (см. рис.1.). Разброс значений  $U_{рез.}$  при концентрации примесей более  $6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> обусловлено, по-видимому, тем же эффектом Френкеля-Пула, так как резко уменьшается толщина ОПЗ и при этих параметрах достаточно контактной разности потенциалов данного полупроводника, чтобы создать поле более  $10^5$  В/см.

Таким образом, зависимость, изображённая на рис.1., достаточно корректно объясняется в рамках активационно-дрейфовой модели в области полей  $10^3$ - $10^5$  В/см и в то же время показывает, когда в работу включаются другие полевые эффекты.

Проведённые нами исследования до применения (новых) оригинальных датчиков Холла, широко используемые в сельскохозяйственной технике, подтвердили наличие выше упомянутых глубоких центров расположенных в диодах Шоттки с помощью резонансной активационно-дрейфовой релаксационной спектроскопии.



Нами также проведены дополнительные исследования глубоких центров в этих электронных структурах после воздействия на них внешних факторов [1,2,9,10], т.е. на датчики, использованные в сельскохозяйственной технике. Концентрации дефектов в полупроводниковых структурах датчиков, создающие глубокие центры значительно снизились до технических характеристик во время заводских сертификационных испытаний. Результаты испытаний характеристик этих сенсоров в соответствии с техническими условиями их использования показали, что их параметры восстановились до заводских характеристик. Таким образом, можно восстанавливать электронные датчики путём воздействия дополнительных факторов.

### **Список литературы:**

1. Каширин Д.Е. Анализ точности определения электрических параметров диодов Шоттки, широко применяемых в сельском хозяйстве / Каширин Д.Е., Левина Т.А., Глухих Я.М., Клочков А.Я., Адылина А.П. // В сборнике: Инновационные научно-технологические решения для АПК. 2023. С. 83-88.
2. Устройство контроля давления в шинах колес транспортного средства с рулевым управлением Гармаш Ю.В., Клочков А.Я., Седунов Б.И. Авторское свидетельство SU 1812454 A1, 30.04.1993. Заявка № 4937452 от 17.05.1991.
3. Каширин Д.Е. Пути восстановления эффективности автодорожных солнечных панелей / Каширин Д.Е., Клочков А.Я., Левина Т.А., Глухих Я.М., Вячеславова О.Ф. // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2023. № 2 (18). С. 71-76.
4. Орешкин П.Т., Долговременная релаксация неравновесной проводимости в поверхностно-барьерных структурах полупроводников / П.Т.Орешкин, А.Я. Клочков, М.В. Зубков, С.В. Патрин // ФТП, т.18. №8. – 1984 С.1503-1506.
5. Клочков А.Я. Тестирование технологии изготовления кремниевых интегральных микросхем по глубоким центрам с применением тестовой ячейки. // Вестник РГРТА. – Вып. 1. – Рязань. – 1996. – С.93-98.
6. Клочков А.Я. Оборудование для тестирования технологии интегральных микросхем по глубоким центрам. // Вестник РГРТА. – Вып. 3. – Рязань. – 1997. – С.63-72.
7. Кузьменко А.П. Место DLTS в тестировании промышленных технологий, трудности и противоречия существующей теории / Кузьменко А.П., Клочков А.Я., Левина Т.А., Левин А.М. // В сборнике: Физика и технология наноматериалов и структур. Сборник научных статей 3-й Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. 2017. С. 309-313.
8. Левина Т.А. Исследование интегрированного технологического процесса получения диэлектрических пленок для интегральных схем. / Т. А. Левина, Я. М. Глухих, А. П. Адылина // В сборнике: Становление и развитие новой парадигмы инновационной науки в условиях современного общества. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции 20 февраля 2024 г. -УФА: НИЦ «АЭТЕРНА» -2024. -С.11-20.
9. Левин А.М. Анализ легированного эпитаксиального кремния методом модуляции волны / А.М. Левин, А.Я. Клочков, М.В. Зубков, Т.А. Левина // В сборнике: Труды X Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению "Диагностика наноматериалов и наноструктур" Сборник трудов. Рязань, 2018. С.116-120.
10. Электронная схема и/или микроэлектромеханическая система с радиационным источником подвижных носителей заряда Зеленцов А.В., Клочков А.Я., Левин А.М. Патент на изобретение RU 2511614 С2, 10.04.2014. Заявка № 2012130438/28 от 17.07.2012.

