

УДК 621.382 (083)

ЭФФЕКТ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Юшина Л.Д., Краев В.В.*, Салихов И.А.*

*Институт высокотемпературной электрохимии Уральского
отделения РАН, Екатеринбург*

**Казанский государственный технический университет
им. А.Н. Туполева, Казань*

Подробная информация об авторах размещена на сайте
«Учёные России» - <http://www.famous-scientists.ru>

Осуществив пролонгированную термообработку диодов серии КД 522 в жестких условиях [при температуре 230°C и обратном напряжении 15 V], удалось достичь не только стабилизации его выходных характеристик, но и расширить диапазон рабочих температур. Объяснение причин наблюдаемого эффекта было проведено с учетом свойств пленочных структур р-n-перехода, присущего в диоде. Исследования диодов КД 522А, КД 509А и транзисторов КТ 203А и МП-42 показали наличие аналогичного эффекта при специальной термообработке элементов в жестких условиях.

Как известно, [1, 2], диоды наряду с другими стандартными полупроводниково-выми приборами используются в качестве точечных датчиков при измерениях температуры. Основными их преимуществами являются высокая чувствительность, малый потребляемый ток, низкая инерционность, малые габариты и дешевизна.

Обычно, верхний температурный предел применения таких датчиков ограничивают паспортными характеристиками. В случае их функционирования при более высоких температурах или температурах, граничных с паспортными значениями, - наблюдается нестабильность выходных параметров устройства во времени.

Нами были предприняты исследования по разработке метода стабилизации вольт-амперных характеристик и расширению температурного диапазона использования некоторых полупроводниковых элементов.

В качестве модельных объектов этого цикла НИР были взяты кремниевые диоды серии КД 522.

Методика эксперимента и результаты

Приборы типа КД-522 – это эпитаксиально-планарные диоды, принцип действия которых основан на использовании свойств проводимости в пленочных структурах р-n-перехода.

В этих приборах базу изготавливают путем наращивания на подложке из низкоомного кремния – тонкого слоя высокоомного полупроводника, повторяющего структуру подложки. Этот эпитаксиальный слой покрывают плотной защитной пленкой диоксида кремния SiO_2 толщиной до 1 мкм. В пленке протравливают окно, через которое путем диффузии бора (или алюминия) создают *p-n* переход, выход которого на поверхность защищен пленкой диоксида кремния. В КД 522 бор (или алюминий), дифференцирующий в кремний является акцепторной примесью [3].

Ранее нами было показано [4], что кремниевые диоды серий КД 522 при температурах ($t=200^\circ\text{C}$ и обратном напряжении $U_{\text{обр}}=10 \text{ В}$), превышающих паспортные значения ($t_{\max \text{ пасп}} < 150^\circ\text{C}$) – выявили нестабильность выходных параметров во времени: вольт-амперные характеристики диодов «плывут». А при повышении температуры до $t=200^\circ\text{C}$ и $U_{\text{обр}}=30 \text{ В}$ – происходит пробой.

В результате проведенной специальной термической обработки данных полупроводниковых элементов в жестких условиях (при обратном напряжении $U_{\text{обр}}=15 \text{ В} > U_{\text{раб}}$ и $t_{\text{отж}}^\circ\text{C} \geq t_{\max \text{ пасп}}^\circ\text{C}$), была достигнута стабилизация их использования при рабочей температуре до 200°C ,

значительно превышающей паспортное значение ($t_{раб} < 150^\circ\text{C}$).

Испытания показали, что при соблюдении условий $t_{\max \text{ пасп}}^\circ\text{C} < t_{раб}^\circ\text{C} < t_{отж}^\circ\text{C}$ и $U_{обр \text{ раб}} < U_{обр \text{ отж}}$, - диоды, подвергнутые пролонгированному термоотжигу при температуре 230°C – функционировали без пробоя.

При проведении термоотжига диоды помещались внутрь резистора (типа ПЭВ-10), являющегося нагревательным элементом. Исследования проводились после установления теплового режима. Точность поддержания температуры составляла $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Оптимальный режим отжига и его длительность были подобраны экспериментально. Охлаждение после отжига проводилось со средней скоростью $40^\circ\text{C}/\text{час}$.

Обсуждение результатов

Фиксируемый эффект стабилизации характеристик объясняется, вероятнее всего, двумя причинами. Во-первых, в диодах серии КД 522, как указывалось выше, присутствуют пленочные слои полупроводника. А в пленках, как известно [5], изначально может наблюдаться нестабильность основных параметров, обусловленная наличием в их структуре вакансий и дефектов. Можно полагать, что энергия, подводимая при отжиге, обеспечивает диффузию и взаимодействие дефектов. А это приводит к их частичному или полному исчезновению и установлению устойчивого состояния. Согласно [5] энергия, необходимая для перемещения дефектов, очень незначительна. Она может изменяться от нуля до энергии активации, необходимой для самодиффузии.

Наряду с этим, в процессе длительного отжига происходит частично необратимый переход как основных, так и неосновных носителей полупроводника на более высокие энергетические уровни. Точнее имеет место перераспределение основных и неосновных носителей заряда в

p - и n -областях, и в самом переходе (искривление зон энергии). Энергия дырок в области основных носителей (p_n) сдвигается в сторону валентной зоны, а у электронов в p -области (n_p) происходит сдвиг в зону проводимости [3, 6]. Причем, для перевода электронов с донорных уровней в зону проводимости необходима малая энергия ΔE_c , которая для кремния составляет $\Delta E_c=0,054 \text{ eV}$ [2, 3, 6]. А свободные примесные энергетические уровни (акцепторные) располагаются несколько выше верхнего края валентной зоны основного кристалла, на расстоянии ΔE_h . Для кремния $\Delta E_h=0,06 \text{ eV}$ [3, 6]. Иными словами, термоотжиг, вероятнее всего, способствует сдвигу энергии дна зоны проводимости E_c и вершины валентной зоны E_v . В результате указанных выше изменений в состояниях энергетических зон полупроводника, высота потенциального барьера (ширина запрещенной зоны) уменьшается. В итоге, после отжига при дальнейшей эксплуатации диодов в более мягких условиях [$T_{отж}^\circ\text{C} > T_{раб}^\circ\text{C} > T_{\max \text{ пасп}}^\circ\text{C}$, $U_{раб} < U_{отж}$] возвращения к первоначальному (доотжиговому) состоянию не происходит, поскольку высота потенциального барьера p - n -перехода в начальном дообжиговом состоянии значительно превышает потенциальный барьер, достигнутый в процессе термообработки. А это в конечном итоге позволяет использовать диоды в более широком температурном интервале.

Как показали НИР, в результате отжига произошло некоторое увеличение обратного тока ($I_{обр}$) исследуемых полупроводниковых элементов. Одной из причин роста ($I_{обр}$) диода может являться термическая генерация носителей заряда в самом переходе (генерация электронно-дырочных пар), приводящая к появлению теплового тока I_t .

Согласно [3, 6] для несимметричной p - n -структуре ($n_p \ll p_n$).

$$I_t = \frac{eSD_pP_n}{L_p} \quad (1)$$

Здесь S – площадь поперечного сечения p - n -перехода, L_p – диффузионная длина дырок в n -области перехода; D_p – коэффициент диффузии дырок примесного полупроводника; p_n – концентрация дырок в n -области перехода; n_p – концентрация электронов в p -области перехода.

В ходе предпринятой обработки диодов с повышением обратного напряжения (до 15 В при отжиге), вследствие расширения перехода – увеличилась его толщина (δ) и объем [4]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}(\varphi_k + U) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_g} \right)} \quad (2)$$

Здесь φ_k – контактная разность потенциалов, ε - диэлектрическая проницаемость; (φ_k+U) – общее напряжение на переходе; N_a и N_g – концентрация доноров и акцепторов в переходе, соответственно.

И, как следствие, - число термически генерированных в переходе носителей заряда и тепловой ток перехода (I_T) – возросли. Этот эффект особенно заметен в кремневых диодах, которым свойственен

$$I_o = \frac{eSD_p P_n}{L_p} = \frac{eSD_p N_c^2}{L_p N_g} \exp \frac{-\Delta W}{kT} \quad (3)$$

или

$$I_o = I_T \exp \frac{-\Delta W}{kT} \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) ΔW – ширина запрещенной зоны; I_T – тепловой ток (см.уравнение 1); N_g – концентрация донорной примеси; N_c – эффективная плотность состояния в зоне проводимости.

S ; D_p ; L_p ; e и P_n имеют тот же физический смысл, что и в уравнении (1); kT – имеют общепринятое значение.

$$I_{обр} = I_o + I_T + I_y \quad (5)$$

Здесь I_o – ток экстракции электронно-дырочного перехода, I_T – тепловой ток, I_y – возможный ток утечки.

Однако следует подчеркнуть - выполненные исследования показали, что наблюдаемое увеличение обратного тока ($I_{обр}$) диодов после отжига, - незначительно и находится в диапазоне разбросов основных характеристик полупроводниковых элементов рассматриваемой серии.

Заключение

Исследованы вольт-амперные характеристики кремневых диодов серии КД 522 в широком температурной интервале. Отмечено, что в случае их функционирования при температурах, превышающих паспортные значения (или граничные с

малый ток экстракции (I_o). Для них $I_T > I_o$ [6].

Как известно [3], наиболее сильное влияние температура оказывает на ток экстракции (I_o) электронно-дырочного перехода, поскольку его величина пропорциональна концентрации неосновных носителей заряда:

В свою очередь, концентрация неосновных носителей с повышением температуры увеличивается по экспоненциальному закону [3]. В результате перечисленные выше причины при росте температуры вызывают увеличение общего обратного тока ($I_{обр}$), проходящего через $p-n$ -переход:

ними) – наблюдается нестабильность выходных параметров во времени. Используя длительную термообработку диодов в жестких условиях, удалось добиться не только стабилизации основных характеристик, но и заметно расширить диапазон рабочих температур (поднять верхний предел рабочих температур до +200°C). После проведенного отжига диоды стабильно функционировали при соблюдении условий: $T_{max} \text{ паp}^{\circ}\text{C} < T_{раб}^{\circ}\text{C} < T_{отж}^{\circ}\text{C}$, и $U_{раб} < U_{отж}$, В.

Обсуждены возможные причины, обусловившие проявление указанного эффекта термостабилизации. Следует подчеркнуть, что наблюдаемый эффект может иметь место у разных типов и классов полупроводниковых приборов. Так, в ходе

испытаний диодов КД 503А, КД 509А и транзисторов КТ 203А и МП – 42, подвергнутых специальному отжигу, нами зафиксировано аналогичное расширение интервала рабочих температур и стабилизация выходных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Викулин И.М., Стafeев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
2. Гитцевич И.В., Баюков А.В., Зайцев А.А. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 744 с.
3. Батушев В.А. Электронные приборы. М.: Высшая школа, 1980. 384 с.
4. Юшина Л.Д., Краев В.В., Салихов И.А. // Современные научноемкие технологии. 2007. №12. с.126.
5. Технология тонких пленок. Под ред. Майссела Л. М.: Сов.радио, 1977. 775 с.
6. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1987. 480 с.

EFFECT OF STABILIZING DIODES CHARACTERISTICS BY USING THE SPECIAL THERMO-TREATMENT

Yushina L.D., Krayev V.V.*, Salikhov I.A.*

*Institute of High-Temperature Electrochemistry of Russian Academy of Sciences Ural Division,
Ekaterinburg*

**Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan*

It was carried out the prolonged thermo-treatment of diodes seria КД 522 into the hard conditions [$t_{th} = 230^{\circ}\text{C}$ by $U_{reu} = 15 \text{ V}$]. This processing allowed to reach not only the stability of the exit diodes characteristics but it have extended the region of theirs working temperatures also. The explanation of reasons this effect was realized calculating the properties of the film structure *p-n*-transition which one presented into diode КД 522. Preliminary Investigations diodes seria КД 503А, КД 509А and transistors seria KT 203А and MP-42 were showed also analogical effect by the special thermo-treatment of elements.