

8. Pern F.J. Luminescence and absorption characterization of the structural effects of thermal processing and weathering degradation on Ethylene Vinyl Acetate (EVA) encapsulant for PV modules // Polymer degradation and stability, - 1993, - V. 41, - P. 125-139.

9. Wang A., Zhao J., Wenham S.R., Green M.A. 21,5 % efficient thin Silicon solar cell // Progress in PV: Res. and Appl. - 1996, - V. 4, - P. 55-58.

ГИУА

28.11.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. L, №1, 1997, с. 36-40.

УДК 621.382.017.7

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Г. КИРАКОСЯН, Г.А. МАКАРЯН, А.С. ШАБОЯН

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ПО ТОКУ СИЛОВОГО ТРАНЗИСТОРА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ВЫСОКОГО УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ

Чառաքել էն ուժային տրանզիստորների դիֆուզային խորությունների տեսակետ և փորձարարական հետազոտություններ: Նկատվում է էմիտերային անցման խորությունների հաշվարկային և փորձնական արժեքների լավ համընկնում: Կոլեկտորային անցման խորությունների արժեքների տարբերությունը պայմանավորված է ակցեպտորային խառնուրդների տվյալ դիֆուզային մեխանիզմի առնանկափակությամբ: Ստացվել են ըստ հոսանքի առաջնայնայն ուժեղացման գործակցի  $h_{21\beta 0}$ -ի և ուժային տրանզիստորի դիֆուզային պարամետրերի տեղադրությունը: Արտահայտությունում էքսպոնենենտային արտադրիչի առկայությունը  $h_{21\beta 0}$ -ի համար պայմանավորված է ընդլայնման բարձր մակարդակով:

Проведены теоретические и экспериментальные исследования диффузионных глубин силовых транзисторов. Наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений глубины эмиттерного перехода. Отличие значений глубины коллекторного перехода обусловлено ограниченностью данного механизма диффузии акцепторных примесей. Получены зависимости максимального коэффициента усиления по току  $h_{21\beta 0}$  от диффузионных параметров силового транзистора. Наличие экспоненциального множителя в выражении для  $h_{21\beta 0}$  обусловлено эффектом ВУД.

Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

Theoretical and experimental studies of power transistor diffusion depths are performed. A good coincidence of design and experimental values for emitter junction depth is observed. The value difference of collector junction depths is due to the limitation of the acceptor impurity diffusion mechanism. Dependencies of maximum current gain  $h_{21\beta 0}$  are obtained from diffusion parameters of a power transistor. The availability of an exponential factor for  $h_{21\beta 0}$  is conditioned by a high doping effect.

Table 1. Ref. 5.

Исследование зависимости максимального коэффициента усиления по току силового транзистора от диффузионных параметров, в частности, от глубин залегания эмиттерных и коллекторных переходов, представляет определенный научный и практический интерес. Рассмотрению этого вопроса посвящены работы [1, 2], в которых дается качественный анализ

уменьшения  $h_{21\beta 0}$  при увеличении глубин переходов, однако не приводятся количественные исследования для выявления степени влияния диффузионных параметров на  $h_{21\beta 0}$  силового транзистора.

В работе рассчитываются глубины залегания эмиттерных  $x_{\beta}$  и коллекторных  $x_{\beta k}$  переходов при заданных условиях диффузии, а также получены аналитические зависимости  $h_{21\beta 0}$  от диффузионных глубин транзистора с учетом эффекта высокого уровня легирования (ВУЛ).

**Расчет диффузионных глубин силового транзистора.** При образовании эмиттерных и базовых областей силового транзистора проводится двухстадийная диффузия донорных и акцепторных примесей. Первая стадия диффузии происходит из бесконечного источника примеси в полупроводниковую пластину, вторая стадия - из конечного источника, т.е. отсутствует поток через поверхность ( $x=0$ ). Решая одномерное уравнение второго закона Фика, имеем

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[ - \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии примеси;  $Q$  — общее количество примеси в полупроводниковой пластине;  $x$  — расстояние от поверхности;  $t$  — время диффузии.

Для формирования базовой области  $p$ -типа в  $n^-$ -подложку исходной кремниевой эпитаксиальной пластины типа  $n^-/n^+$  проводится односторонняя двухстадийная диффузия галлия. При этом глубина коллекторного перехода с учетом формулы (1) принимает вид

$$x_{\beta k} = 2\sqrt{D_{Ga} t_{Ga}} \sqrt{\ln(N_{Ga}^0 / N_n)}, \quad (2)$$

где  $N_{Ga}^0 = Q_{Ga} / \sqrt{\pi D_{Ga} t_{Ga}}$  — поверхностная концентрация акцепторных примесей после второй стадии;  $N_n$  — концентрация доноров в однородно легированной подложке.

Для подложки с удельным сопротивлением  $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и при экспериментально установленных режимах диффузии ( $t_{Ga} = 15 \text{ мин}$ ,  $t_{Ga} = 6,67 \text{ ч}$ ), используя формулу (2), получим  $x_{\beta k}^{pac} = 15,68 \text{ мкм}$ . Заметим, что в этом случае межузловой механизм диффузии исключается ввиду того, что диаметр атома галлия ( $1,36 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}$ ) намного превышает диаметр атома кремния ( $1,17 \cdot 10^{-4} \text{ мкм}$ ). Поэтому после диффузии галлия образуется твердый раствор замещения, для которого  $D_{Ga}$  и диффузионная глубина  $x_{\beta k}^{pac}$  относительно малы. При аналогичных условиях диффузии экспериментальное значение глубины коллекторного перехода равно  $x_{\beta k}^{exp} = 24 \text{ мкм}$ . Большая разница между расчетными и экспериментальными значениями обусловлена тем, что подложка содержит разного рода неравновесные дефекты (изолированные дислокации, дислокационные стенки, малоугловые границы зерен и др.), которые ускоряют диффузионный процесс.

Для формирования эмиттерной области  $n^+$ -типа силового транзистора проводится односторонняя двухстадийная диффузия фосфора в область  $p$ -типа. Аналогично с учетом формулы (1) для глубины эмиттерного перехода получим

$$x_{jp} = 2\sqrt{D_p t_p} \sqrt{\ln[N_p^0 / N_{Ga}(x_{jp})]}. \quad (3)$$

Совместно решая (1) и (3), после преобразований для глубины эмиттерного перехода получим

$$x_{jp} = \left\{ \frac{4D_p t_p \ln(N_p^0 / N_{Ga}^0)}{1 - [(D_p t_p) / (D_{Ga} t_{Ga})]} \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

При экспериментально установленных режимах диффузии фосфора ( $t_p' = 45$  мин,  $t_p = 1,5$  ч) имеем  $x_{jp}^{calc} = 6,34$  мкм. При аналогичных условиях диффузии экспериментальное значение глубины эмиттерного перехода равно  $x_{jp}^{exp} = 7$  мкм. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений глубины эмиттерного перехода объясняется тем, что диффузия фосфора происходит по межузловому механизму. Так, например, коэффициент диффузии фосфора в кремнии очень велик:  $D_p \approx 3 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с при температуре  $T = 1150^\circ\text{C}$ , поэтому значительная доля атомов фосфора находится в межузловой решетке кремния, хотя диаметры их близки (у фосфора -  $1,1 \cdot 10^{-4}$  мкм, а у кремния -  $1,17 \cdot 10^{-4}$  мкм). Поскольку коэффициент диффузии в твердом растворе внедрения гораздо больше, чем коэффициент замещения, то именно диффузия определяет большое значение  $D_p$ . Этот механизм адекватно описывается уравнением второго закона Фика.

**Определение числа Гуммеля силового транзистора.** Для расчета максимального коэффициента усиления по току  $h_{21\omega 0}$  силового транзистора пользуются моделью контролируемого заряда Гуммеля-Пува [3]. При условии равенства единицы коэффициента переноса базы  $h_{21\omega 0}$  определяется как [4]:  $h_{21\omega 0} = (Q_e / D_e) / (Q_{Ba} / D_B)$ , где  $D_e$  и  $D_B$  — эффективные коэффициенты диффузии неосновных носителей заряда в эмиттере и базе;  $Q_e$  и  $Q_{Ba}$  — так называемые эффективные числа Гуммеля для эмиттера и базы. Число Гуммеля  $Q_e$  для эмиттера с учетом эффекта ВУЛ определяется выражением

$$Q_e = \int_0^{x_{jp}} N_+(x) \exp[-\Delta \epsilon_G / (kT)] dx, \quad (5)$$

где

$$N_+(x) = \frac{Q_p}{\sqrt{\pi D_p t_p}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_p t_p}\right) \pm \frac{Q_{Ga}}{\sqrt{\pi D_{Ga} t_{Ga}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{Ga} t_{Ga}}\right). \quad (6)$$

В практических расчетах используют эмпирические аппроксимации зависимости сужения запрещенной зоны  $\Delta \epsilon_G$  от суммарной концентрации легирующей примеси  $N_+(x)$ . Одна из таких аппроксимаций для кремния вблизи комнатной температуры  $250 \text{ K} \leq T \leq 350 \text{ K}$  имеет вид [5]

$$\Delta \epsilon_G = V_i \ln(N_+ / N_G), \quad (7)$$

где сужение ширины запрещенной зоны  $\Delta \epsilon_G$  измеряется в эВ;

$V_i = 0,025 \cdot 10^{-14} = \text{эрг}$ , а эмпирическая постоянная  $N_G \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Совместно решив (5)-(7), разложив подинтегральную экспоненту по малому параметру

$$z = \frac{V_i Q_{Ga}}{kT Q_p} \sqrt{\frac{D_p t_p}{D_{Ga} t_{Ga}}} \exp \left[ \frac{x_{ja}^2}{4} \left( \frac{1}{D_p t_p} - \frac{1}{D_{Ga} t_{Ga}} \right) \right] \quad (8)$$

и ограничившись линейным членом разложения, после интегрирования для  $Q_s$  получим

$$Q_s = \left\{ Q_p \operatorname{erf} \left[ \frac{x_{ja} \sqrt{1 - V_i / (kT)}}{2 \sqrt{D_p t_p}} \right] - Q_{Ga} \operatorname{erf} \left[ \frac{x_{ja} \sqrt{1 - V_i / (kT)}}{2 \sqrt{D_{Ga} t_{Ga}}} \right] \right\} \times \exp \left[ -\frac{V_i}{(kT)} \ln \left( \frac{Q_p}{N_G \sqrt{\pi D_p t_p}} \right) \right] \times \frac{1}{\sqrt{1 - V_i / (kT)}} \quad (9)$$

Число Гуммеля  $Q_{BA}$  для активной базы определяется в виде

$$Q_{BA} = \int_{x_a}^{x_b} N_-(x) dx. \quad (10)$$

Подставив в (10) выражение (6), после простого интегрирования для  $Q_{BA}$  получим

$$Q_{BA} = Q_p \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x_{jk}}{2 \sqrt{D_p t_p}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x_{ja}}{2 \sqrt{D_p t_p}} \right) \right] - Q_{Ga} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x_{jk}}{2 \sqrt{D_{Ga} t_{Ga}}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x_{ja}}{2 \sqrt{D_{Ga} t_{Ga}}} \right) \right]. \quad (11)$$

Таблица

$h_{21\beta 0}$	$x_{ja}, \text{ мкм}$	$x_{jk}, \text{ мкм}$	$t_p, \mu\text{с}$	$t_{Ga}, \mu\text{с}$
10,24	6	16	1,3	6,94
15,51	7	17	1,7	7,94
26,00	8	18	2,2	8,94
34,57	9	19	2,6	10,00
55,91	10	20	3,2	11,10

Согласно определению  $h_{21\beta 0}$ , с учетом выражений (9) и (11) для максимального коэффициента усиления по току  $h_{21\beta 0}$  получим

$$h_{21\beta 0} = \frac{D_B}{D_p} \frac{\exp\left[-\frac{V_1}{kT} \ln\left(\frac{Q_p}{N_{G0} \sqrt{\pi D_p t_p}}\right)\right]}{\sqrt{1-V_1/(kT)}} \times$$

$$\left\{ Q_p \operatorname{erf}\left[\frac{x_{j\beta} \sqrt{1-V_1/(kT)}}{2\sqrt{D_p t_p}}\right] - Q_{G0} \operatorname{erf}\left[\frac{x_{j\beta} \sqrt{1-V_1/(kT)}}{2\sqrt{D_{G0} t_{G0}}}\right] \right\} \quad (12)$$

$$\times \frac{\left\{ Q_p \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x_{jk}}{2\sqrt{D_p t_p}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_{j\beta}}{2\sqrt{D_p t_p}}\right) \right] - Q_{G0} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x_{jk}}{2\sqrt{D_{G0} t_{G0}}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_{j\beta}}{2\sqrt{D_{G0} t_{G0}}}\right) \right] \right\}}{1}$$

Согласно формуле (12), рассчитывается  $h_{21\beta 0}$  в зависимости от  $x_{j\beta}$  и  $x_{jk}$  при фиксированной толщине активной базы  $x_{jk} - x_{j\beta} = W_{БЛ}$ . Полученные значения представлены в таблице.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Варданян А.А., Авагян Р.В., Малышева Л.И. Исследование влияния глубины залегания эмиттерного перехода на коэффициент инжекции эмиттера силовых транзисторов серии ТК // Технология быстродействующих силовых полупроводниковых приборов: Сб. науч. ст. - Таллин: Валгус, 1984. - С. 112-116.
2. Авагян Р.В., Варданян А.А., Киракосян Г.Г., Шагоян А.С. Силовые твердотельные транзисторные ключи с многокаскадным усилением // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1990. - Т. 43, № 5. - С. 220 - 225.
3. Киракосян Г.Г., Макарян Г.А., Шабоян А.С. Определение условий надежной работы составного транзистора в режиме насыщения // Изв. НАН Армении. Сер. ТН. - 1994. - Т. 37, № 1-2. - С. 49-52.
4. Блехер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 265 с.
5. Тугов Н.М., Глебов В.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 387 с.

НПП "Транзистор"

14.05.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. L, № 1, 1997, с. 40 - 45.

УДК 681.325.5

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Х.В. КЕРОПЯН, Э.А. КАЗАРЯН, Т.Ю. БАРОЯН

## СТАЦИОНАРНОЕ УКРУПНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПОЛУМАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ

Նկատարվող կիսամարկովյան գործընթացի լավարկման խնդրի չափի փոքրացման համար առաջարկվում է օգտագործել բարդ համակարգերի հաստատուն խոչըրացման մեթոդը: Ձևակերպվում են լեմմաներ, որոնք հաստատում են սկզբնական և խոչըրացված դեկավարվող կիսամարկովյան գործընթացների՝ միավոր ժամանակում միջին հաստատուն շահույթների և դեկավարման լավարկված ռազմավարության հավասարությունը: