

УДК 621.382

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА С p - n ПЕРЕХОДОМ

Н.С. АРАМЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении

(Поступила в редакцию 15 мая 2006 г.)

Получено выражение для распределения электрического поля в базе полупроводникового диода с p - n переходом, справедливое при произвольных уровнях инжекции, в приближении экспоненциальности распределения неравновесных носителей в базе диода. Показано, что при некотором токе через диод поле вдоль базы постоянно, что позволяет определить подвижность основных носителей (концентрация определяется из измерений барьерной емкости). Для промышленных диодов Д223Б и Д219А измерены ВАХ и дифференциальное сопротивление и вычислены подвижности электронов. Для диода Д223Б приведено распределение электрического поля при трех уровнях инжекции.

1. Введение

В ряде работ было показано, что полупроводниковый диод с p - n переходом удобно использовать для определения параметров материала базы диода, таких как концентрация свободных носителей, подвижность, а также время жизни неравновесных носителей и его зависимость от уровня инжекции [1–3]. Физические явления в полупроводниковом диоде с p - n переходом хорошо изучены [4–6], однако для определения параметров базы диода приходится иметь дело с распределением электрического поля вдоль базы диода, точный расчет которого, основанный на решении уравнения непрерывности для инжектированных в базу носителей, сопряжен со значительными математическими трудностями [7]. Приближенный расчет проводят с использованием распределения носителей, полученным из решения уравнения диффузии в пренебрежении полевыми членами [8], что правомерно только при низких уровнях инжекции. При высоких уровнях инжекции данное распределение само зависит от электрического поля в базе диода, что может приводить к существенным ошибкам при определении параметров базы диода. Основным выводом приближенного рассмотрения проблемы является то, что распределение неравновесных носителей в базе диода при высоких уровнях инжекции является экспоненциальным с длиной диффузии, зависящей от электрического поля [5,7], вследствие вытягивания носителей вглубь базы электрическим полем.

В данной работе в предположении экспоненциальности распределения

неравновесных носителей вдоль базы диода получено довольно компактное выражение для электрического поля, пригодное при произвольных уровнях инжекции. Для промышленных диодов Д219А и Д223Б на основе измерений ВАХ и дифференциального активного сопротивления вычислено распределение электрического поля, а также показано, что учет особенностей этого распределения позволяет при известной концентрации равновесных электронов n_0 (из измерений барьерной емкости) определить их подвижность μ_n .

2. Расчет электрического поля

Рассмотрим “длинный” диод и предположим, что избыточная концентрация дырок в базе p -типа описывается распределением

$$\Delta p(x) = \Delta p(0) e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

где $\Delta p(0)$ – избыточная концентрация в плоскости p - n перехода при $x = 0$, α – коэффициент, зависящий от уровня инжекции и имеющий смысл обратной диффузионной длины. Коэффициент α должен зависеть от x , поэтому в (1) α является усредненным по длине базы параметром. Учет полевых членов в уравнении непрерывности позволяет совместно рассмотреть это уравнение для основных носителей – электронов и неосновных носителей – дырок. Комбинируя эти два уравнения, можно получить уравнение, не содержащее время жизни в явном виде:

$$D_p (b-1) \frac{d^2(\Delta p)}{dx^2} + \mu_p (b+1) E(x) \frac{d(\Delta p)}{dx} + \mu_p [(b+1) + b n_0] \frac{dE}{dx} = 0, \quad (2)$$

где $E(x)$ – электрическое поле, D_p – коэффициент диффузии дырок; b – отношение подвижности электронов к подвижности дырок; μ_p – подвижность дырок, n_0 – равновесная концентрация электронов в базе диода.

Уравнение (2) получено в предположении электрической нейтральности полупроводника: $\Delta p = \Delta n$. Подстановка распределения (1) в (2) позволяет получить уравнение для $E(x)$:

$$\frac{(b+1)\Delta p(0)e^{-\alpha x} + b n_0}{\Delta p(0)e^{-\alpha x}} \frac{dE}{dx} - (b+1)\alpha E(x) + \frac{kT}{q}(b-1)\alpha^2 = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) интегрируется методом разделения переменных, в результате получаем выражение

$$E(x) = \left(E_0 - \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \alpha \right) \left[1 + \frac{b}{b+1} \frac{n_0}{\Delta p(0)} \right] \frac{e^{\alpha x}}{1 + \frac{b}{b+1} \frac{n_0}{\Delta p(0)} e^{\alpha x}} + \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \alpha, \quad (4)$$

где E_0 – электрическое поле при $x = 0$.

Из (4) видно, что при относительно низких уровнях инжекции, когда

$E_0 < \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \alpha$, электрическое поле вглубь базы, т.е. при возрастании x , убывает; при

относительно высоких уровнях инжекции, когда $E_0 > \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \alpha$,

электрическое поле с ростом x возрастает. При $E_0 = \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \alpha$ электрическое

поле не зависит от x и постоянно вдоль базы. Такое поведение электрического поля можно объяснить следующим образом. Из условия электрической нейтральности $\Delta p = \Delta n$ вытекает, что диффузионные токи электронов и дырок должны быть равны в произвольном сечении базы, т.е. при любом x . При низких уровнях инжекции, когда концентрация основных носителей практически постоянна вдоль базы, для выполнения данного условия электрическое поле вблизи плоскости p - n перехода при $x = 0$ должно быть больше, чем в глубине базы. При этом разница в диффузионных токах электронов и дырок (из-за разницы в их подвижностях) компенсируется возрастанием дрейфовой составляющей тока основных носителей. При высоких уровнях инжекции происходит существенная модуляция проводимости базы инжектированными носителями, следствием чего является меньшее значение электрического поля вблизи плоскости p - n перехода по сравнению с электрическим полем в глубине базы. Из выражения (4) видно, что при $b=1$, т.е. при равенстве подвижностей электронов и дырок, проявляется только эффект модуляции проводимости базы при произвольных уровнях инжекции. Вышесказанное физически представляется очевидным, однако выражение (4), описывающее поведение электрического поля при произвольных уровнях инжекции, получено нами впервые.

Рассмотрим резкий асимметричный p - n переход с базой n -типа, для которого электронный ток при $x=0$ пренебрежимо мал [3]. Из условия равенства нулю этого тока можно получить

$$E_0 = \frac{b \frac{n_0}{\Delta p_0}}{2 + \frac{n_0}{\Delta p_0}} E_\infty, \quad E_\infty = \frac{I}{q \mu_n n_0}, \quad (5)$$

где I - ток через диод, q - заряд электрона, μ_n - подвижность электронов. Из этого же условия с использованием распределения (1) получим

$$E_0 = \frac{kT}{q} \alpha \frac{1}{1 + \frac{n_0}{\Delta p(0)}}. \quad (6)$$

Формула (5) нами использовалась для вычисления E_0 , а формула (6) - для вычисления α .

3. Экспериментальные результаты

Для определения основных параметров, характеризующих работу диода при произвольных уровнях инжекции, нами измерялись ВАХ и дифференциальное активное сопротивление двух промышленных диодов - Д219А и Д223Б.

Геометрические размеры диодов брались из нашей работы [2]. Избыточная концентрация дырок вычислялась по формуле

$$\Delta p(0) = \frac{n_i^2}{n_0} e^{\frac{qU_{p-n}}{kT}}, \quad (7)$$

где n_i - собственная концентрация электронов в кремнии, U_{p-n} - напряжение на $p-n$ переходе:

$$U_{p-n} = U_d - U_b, \quad (8)$$

Здесь U_d - напряжение на диоде, U_b - падение напряжения на базе диода. U_b определялось графически по формуле

$$U_b = \int_0^I r_b(I) dI, \quad (9)$$

где $r_b(I) = r_d - r_{p-n}$ - дифференциальное сопротивление базы, r_d - измеренное дифференциальное сопротивление диода, а дифференциальное сопротивление $p-n$ перехода берется в виде

$$r_{p-n} = \frac{kT}{qI}. \quad (10)$$

Формула (5) позволяет определить ток, при котором напряженность поля вдоль базы постоянна, из условия

$$\frac{b \frac{n_0}{\Delta p(0)}}{2 + \frac{n_0}{\Delta p(0)}} = 1.$$

При этом токе имеем

$$E_0 = E_\infty = \frac{U_b}{W}, \quad (11)$$

где W - длина базы диода. Из (11) при известном значении n_0 (которое определялось из измерений барьерной емкости) довольно просто вычисляется подвижность электронов μ_n - 1286 см²/В(сек для Д223Б и 1330 см²/В·сек для Д219А).

На рис.1 представлены вычисленные зависимости электрического поля от координаты x при трех уровнях инжекции для диода Д223Б.

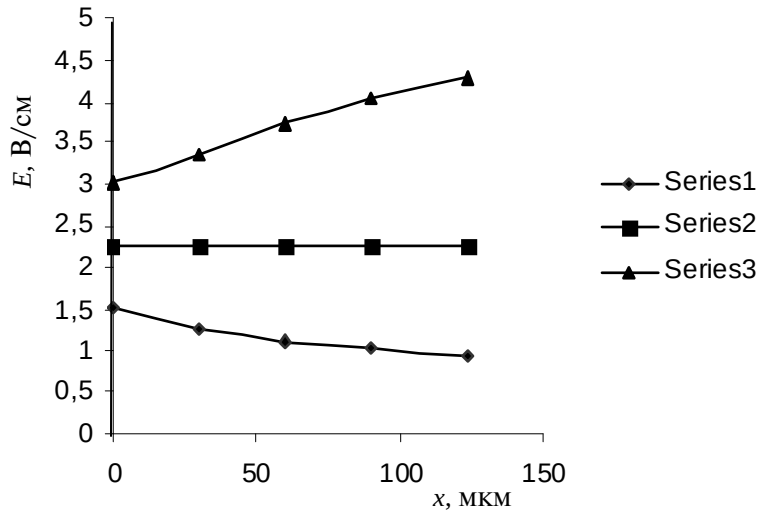


Рис.1. Зависимости электрического поля от координаты x при трех уровнях инжекции для диода Д223Б: 1 - $\Delta p(0)/n_0 = 0.31$, 2 - $\Delta p(0)/n_0 = 0.8$, 3 - $\Delta p(0)/n_0 = 1.52$. Кривая 2 соответствует току, при котором вычисляется подвижность.

Отметим, что для определения подвижности и диффузионной длины используются формулы (5) и (6), относящиеся к границе p - n перехода при $x=0$, поэтому зависимость параметра α от x не должна влиять на точность определения этих параметров. Может иметь место ошибка в определении параметра α при высоких уровнях инжекции из-за неточности определения дифференциального сопротивления p - n перехода по формуле (10).

Таким образом, показано, что полупроводниковый диод с p - n переходом можно использовать как для определения концентрации свободных носителей в базе диода (из измерений барьерной емкости), так и для определения их подвижности (при учете особенностей распределения электрического поля в базе диода).

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.И.Адирович, А.И.Губкин, Б.Д.Копыловский. ФТТ, **4**, 1853 (1962).
2. А.Г.Алексян, Н.С.Арамян, Р.К.Казарян. Изв. АН АрмССР, Физика, **25**, №1, 36 (1990).
3. В.В.Тогатов, П.А.Гнатюк. ФТП, **39**, 378 (2005).
4. И.П.Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., Энергоиздат, 1977.
5. С.Зи. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. М., Мир, 1984.
6. А.А.Лебедев, А.А.Лебедев, Д.В.Давыдов. ФТП, **34**, 113 (2000).
7. В.И.Стафеев. ЖТФ, **28**, 1631 (1958).
8. С.П.Синица. Радиотехника и электроника, **7**, 1427 (1962).

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԲԱՇԽՈՒՄԸ
ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՃԱՅԻՆ $p-n$ ԱՆՅՈՒՄՈՎ ԴԻՈԴԻ ԲԱԶԱՅՈՒՄ

Ն.Ս. ԱՐԱՄՅԱՆ

Կիսահաղորդչային $p-n$ անցումով դիոդի համար ստացված է արտահայտություն բազայում էլեկտրական դաշտի բաշխման համար, որը կիրառելի է ինժեկցիայի ցանկացած մակարդակի դեպքում: Ցույց է տրված, որ դիոդի որոշակի հոսանքի դեպքում դաշտը բազայի երկարությամբ հաստատուն է, ինչը թույլ է տալիս որոշել հիմնական լիցքատարների շարժունակությունը (խտությունը որոշվում է փակոցայինի ունակության չափումներից): Արդյունաբերական D223B և D219A դիոդների համար չափված են ՎԱԲ և դիֆերենցիալ դիմադրությունը և հաշվարկված են էլեկտրոնների շարժունակությունները: Բերված է էլեկտրական դաշտի բաշխումը D223B դիոդի համար ինժեկցիայի երեք մակարդակների դեպքում:

ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN THE BASE
OF A SEMICONDUCTOR $p-n$ JUNCTION DIODE

N.S. ARAMYAN

The electric field distribution in the base of a semiconductor $p-n$ junction diode is obtained, which is valid at arbitrary injection levels, in the exponential distribution approximation for nonequilibrium carriers in the diode base. It is shown that at a certain current the field across the base is constant, which allows one to determine the mobility of majority carriers (the carrier density is determined from barrier capacity measurements). Current-voltage characteristics and differential resistance for commercial diodes D223B and D219A are measured and the mobility of electrons is calculated. The distribution of the electric field for D223B diode is calculated at three injection levels.