

Оптимальное легирование дрейфовой области монополярных диодов и транзисторов

© А.С. Кюрегян[¶]

Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина,
111250 Москва, Россия

(Получена 20 марта 2001 г. Принята к печати 10 мая 2001 г.)

Получено точное аналитическое решение задачи минимизации сопротивления дрейфовой области мощных монополярных приборов. Показано, что оптимальный профиль легирования $N(x)$ имеет минимум в центральной части дрейфовой области и неограниченно возрастает при приближении к обсем ее границам.

Мощные монополярные приборы (диоды Шоттки, полевые транзисторы с вертикальной структурой) обладают рядом несомненных достоинств по сравнению с биполярными при относительно низких напряжениях пробоя U_B . Однако при больших U_B их эффективность катастрофически падает из-за быстрого роста сопротивления R относительно высокоомного слоя¹, на котором падает практически все напряжение в блокирующем состоянии [1]. Если этот слой толщиной d однородно легирован донорами с концентрацией N и целиком заполняется областью пространственного заряда (ОПЗ) только при напряжении $U = U_B$, то распределение поля $E(x)$ в ОПЗ треугольное (рисунок, a , кривая 1) и при заданном U_B выполняются очевидные равенства

$$d = w_{BS} \equiv 2U_B/E_{BS}, \quad N = N_S \equiv \varepsilon E_{BS}^2/2qU_B, \quad (1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость полупроводника, q — заряд электрона, E_{BS} — максимальная напряженность поля в ОПЗ такого прибора при пробое. Строго говоря, E_{BS} уменьшается с ростом U_B по логарифмическому закону [2,3]. Однако для облегчения аналитических расчетов часто [4,5] применяют функцию вида

$$E_{BS} = \tilde{E}(\tilde{U}/U_B)^{1/(m-1)}, \quad (2)$$

которая следует из упрощенного критерия пробоя

$$\int_0^d \alpha[E(x)]dx = 1 \quad (3)$$

при использовании степенной аппроксимации зависимости эффективного коэффициента ударной ионизации от E

$$\alpha(E) = a(E/\tilde{E})^m, \quad (4)$$

где a , \tilde{E} и m — параметры материала, а $\tilde{U} = (m+2)\tilde{E}/2a$. В настоящей работе мы также будем использовать эту

аппроксимацию. Соотношения (1), (2) приводят к известной [1] формуле для сопротивления дрейфовой области:

$$RA = r_S \equiv \frac{4\tilde{U}^2}{\varepsilon\mu\tilde{E}^3} \left(\frac{U_B}{U}\right)^{(2m+1)/(m-1)}, \quad (5)$$

где μ — подвижность электронов, A — площадь прибора. Как видно, для изготовления монополярных приборов следует использовать полупроводники с большим значением произведения $(\varepsilon\mu\tilde{E}^3)$; особенно хороши в этом смысле широкозонные материалы (SiC, GaN, AlN, алмаз) [6,7]. Однако при выборе любого материала важно минимизировать r , оптимизируя профиль легирования дрейфовой области $N(x)$.

Попытка оптимизации для самого простого и важного случая однородной по площади дрейфовой области была предпринята автором работы [8], который решал вариационную задачу, используя равенства (2) в качестве критерия пробоя. Строго говоря, этого нельзя делать даже при оптимизации однородно легированной дрейфовой области. Действительно, в этом случае должны выполняться очевидные неравенства: $d < w_{BS}$ и $N < N_S$ (см. рисунок, кривые 2), поэтому E_B определяется только концентрацией примесей,² но не зависит ни от U_B , ни от d ; для аппроксимации (4) получается

$$E_B = \tilde{E}[N(d)/\tilde{N}]^{1/(m+1)}. \quad (6)$$

Используя (6) и известное соотношение $U_B = E_B d - qNd^2/2\varepsilon$, легко показать, что при заданном U_B минимальное значение сопротивления однородно легированной базы равно

$$r = r_0 \equiv r_S \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{m+1}{m+2}\right)^{(m+2)/(m-1)} \times \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{m+1}{2m+1}\right)^{(2m+1)/(m-1)} \quad (7)$$

и достигается при

$$N = N_S \left[\frac{4}{9} \cdot \frac{(2m+1)(m+2)}{(m+1)^2}\right]^{(m+1)/(m-1)}, \quad (8)$$

² Это прямо следует из критерия пробоя (3) и уравнения Пуассона при условии постоянства N в пределах слоя эффективного умножения, толщина которого должна быть меньше d . В то же время при $d \geq w_{BS}$ величины U_B , E_{BS} и N однозначно связаны между собой соотношением (1), поэтому равенства (2) и (6) эквивалентны.

[¶] E-mail: kyureg@vei.ru

¹ В дальнейшем для обозначения этого слоя мы будем использовать термин "дрейфовая область" ("drift region"), принятый в англоязычной литературе.

$$d = w_{BS} \left(\frac{2m+1}{m+2} \right)^{1/(m-1)} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{m+1}{2m+1} \right)^{(m+1)/(m-1)}. \quad (9)$$

При типичных [2–5] значениях $m = 5–7$ количественные отличия (7)–(9) от результатов, полученных в [8] для однородно легированной дрейфовой области, незначительны. Однако в общем случае математически корректное решение приводит к качественно новому результату.

При произвольном профиле легирования $N(x)$ сопротивление дрейфовой области прибора единичной площади равно

$$r = \frac{1}{q\mu} \int_0^d \frac{dx}{N(x)}. \quad (10)$$

Так как в блокирующем состоянии напряженность поля связана с концентрацией заряженных примесей уравнением Пуассона

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\varepsilon} N(x), \quad (11)$$

то (10) можно переписать в виде

$$r = \frac{1}{\varepsilon\mu} \int_0^d \frac{dx}{E'}, \quad (12)$$

где $E' \equiv dE/dx$. Нам надо найти функцию $E(x)$, обеспечивающую минимум интеграла в (12) при заданном напряжении пробоя

$$U_B = \int_0^d E(x) dx, \quad (13)$$

который наступает, когда выполняется равенство (3). Это классическая изопериметрическая задача вариационного исчисления [9], решение которой должно удовлетворять уравнению Эйлера для функции $F(x, E, E') = 1/E' - \lambda_1 E + \lambda_2 \alpha(E)$:

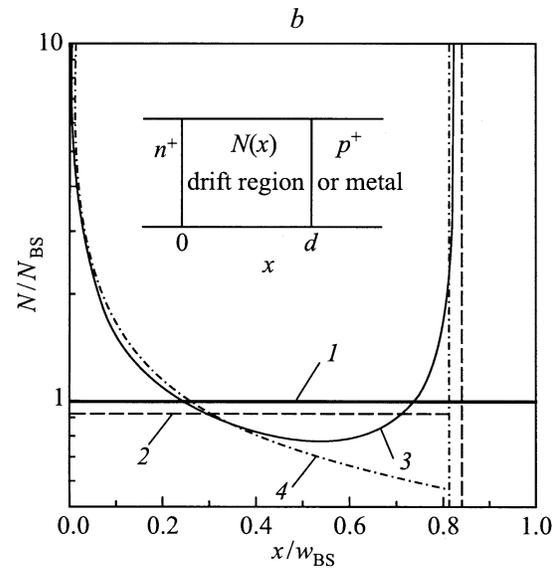
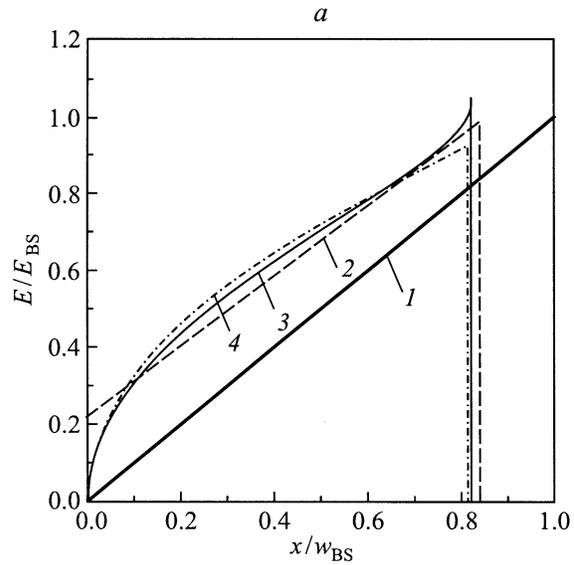
$$2 \frac{E''}{(E')^3} + \lambda_1 - \lambda_2 \frac{d\alpha}{dE} = 0, \quad (14)$$

где $\lambda_{1,2}$ — неопределенные множители Лагранжа. Граничные значения поля $E_0 = E(0)$, $E_B = E(d)$ и положение границы $x = d$ заранее не известны. Поэтому на границе $x = 0$ следует принять “естественное” граничное условие $\partial F / \partial E'|_{x=0} = 0$, а на границе $x = d$ — условия трансверсальности $\partial F / \partial E'|_{x=d} = 0$ и $F(d, E, E') = 0$ [9]. В нашем случае они дают

$$\frac{1}{E'(0)} = \frac{1}{E'(d)} = 0, \quad (15)$$

$$\lambda_1 E_B = \lambda_2 \alpha(E_B). \quad (16)$$

Из (11), (15) следует, что при оптимальном легировании концентрация примесей на обеих границах должна стремиться к бесконечности, поэтому возникает вопрос о правомерности использованного нами предположения



Распределения напряженности поля (a) и легирующей примеси (b) в дрейфовой области при различных способах оптимизации: 1 — однородно легированная дрейфовая область без ограничения ОПЗ ($d = w_{BS}$), 2 — оптимальная однородно легированная дрейфовая область ($d < w_{BS}$), 3 — оптимальная неоднородно легированная дрейфовая область, 4 — оптимизация в пределе критического поля. На вставке — схематическое изображение поперечного сечения диода.

о постоянстве подвижности. Однако анализ показывает, что:

– граничные условия (15) остаются верными при любой зависимости $\mu(N)$, если только проводимость монотонно увеличивается с ростом концентрации;

– для актуальных величин U_B оптимальная концентрация достигает значений, при которых необходимо учитывать зависимость $\mu(N)$ только в ничтожно тонких приграничных слоях, влиянием которых на сопротивление дрейфовой области можно пренебречь.

Поэтому учет непостоянства $\mu(N)$, приводя к сильному усложнению расчетов, не даст ни заметных количественных, ни качественных изменений конечных результатов.

Первый интеграл уравнения (14) с учетом (15) имеет вид

$$\frac{2}{E'} = \lambda_1 E - \lambda_2 \alpha(E). \quad (17)$$

Из (15) и (17) следует, что $\lambda_1 E_0 = \lambda_2 \alpha(E_0)$, т.е. граничные поля являются решениями одного и того же уравнения. Так как любая зависимость $\alpha(E)$ должна быть монотонной и сверхлинейной, причем $\alpha(0) = 0$ [2–5], уравнение (16) имеет только два решения, одно из которых $E_0 = 0$. Этот результат, заранее совершенно неочевидный,³ был бездоказательно принят в работе [8] в качестве одного из граничных условий вариационной задачи.

Второй интеграл уравнения (14) с учетом равенства $E_0 = 0$ принимает вид

$$x = \lambda_1 \frac{E^2}{4} - \frac{\lambda_2}{2} \int_0^E \alpha(E) dE, \quad (18)$$

откуда следует формула для толщины оптимальной дрейфовой области

$$d = \lambda_1 \frac{E_B^2}{4} - \frac{\lambda_2}{2} \int_0^{E_B} \alpha(E) dE. \quad (19)$$

Уравнения для $\lambda_{1,2}$ получаются из (3), (13) с учетом (11), (17). Их решения имеют вид

$$\lambda_1 = \frac{\Phi_2 U_B - \Phi_1 E_B}{\Phi_2/3 - \Phi_1^2} E_B^{-3}, \quad \lambda_2 = \frac{\Phi_1 U_B - E_B/3}{\Phi_2/3 - \Phi_1^2} E_B^{-2}, \quad (20)$$

где $\Phi_k = \int_0^1 t^{2-k} \alpha^k(E_B t) dt$. Подстановка (20) в (16) дает уравнение для максимального поля при пробое

$$(\Phi_2 U_B - \Phi_1 E_B) = (\Phi_1 U_B - E_B/3) \alpha(E_B), \quad (21)$$

которое можно решить численными методами для любой зависимости $\alpha(E)$ и, используя полученные выше формулы, рассчитать все характеристики оптимальной дрейфовой области, в частности сопротивление, равное

$$r = r_a \equiv \frac{1}{4\epsilon\mu E_B^3} \left(\frac{\Phi_2 U_B - \Phi_1 E_B}{\Phi_2/3 - \Phi_1^2} \right)^2 \times \left(\frac{1}{3} + \frac{\Phi_2}{\alpha^2(E_B)} - 2 \frac{\Phi_1}{\alpha(E_B)} \right). \quad (22)$$

³ Например, $E_0 \neq 0$ в случае оптимальной однородно легированной дрейфовой области, рассмотренной выше; кроме того, можно показать, что $E_0 \neq 0$, если принять зависимость $\mu^{-1}(N) = \mu^{-1}(0)(1 + \text{const} \cdot N)$, которая приводит к насыщению проводимости с ростом N из-за примесного рассеяния.

Аналитическое решение, возможное при использовании аппроксимации (3), представимо в параметрическом виде:

$$E = E_B t, \quad (23)$$

$$x = d \frac{m+1}{m-1} \left[t^2 - \frac{2t^{(m+1)}}{m+1} \right], \quad (24)$$

$$N = N_S \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{m-1}{m+2} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{2m+1}{m+1} \right)^{2/(m-1)} (t - t^m)^{-1}, \quad (25)$$

$$E_B = E_{BS} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{2m+1}{m+1} \right)^{1/(m-1)}, \quad (26)$$

$$d = w_{BS} \cdot \frac{m+2}{2} \left[\left(\frac{3}{2} \right)^m \cdot \frac{(m+1)^{(2-m)}}{2m+1} \right]^{1/(m-1)}, \quad (27)$$

$$r_a = r_S \cdot \frac{m+2}{m+1} \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{m+2}{2m+1} \right)^{(m+2)/(m-1)}. \quad (28)$$

Результаты расчета по этим формулам для $m = 6$ представлены на рисунке (a, b , кривые 3). За пределами области эффективного умножения (т.е. при $t^{(m-1)} \ll 1$) оптимальный профиль легирования $N(x)$ легко получить из (24), (25) в явном виде

$$N(x) = N_S \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{m-1}{m+2} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{2m+1}{m+1} \right)^{2/(m-1)} \sqrt{\frac{m+1}{m-1} \cdot \frac{d}{x}}. \quad (29)$$

Как и следовало ожидать, он отличается от профиля [8] только численным множителем. Однако в области эффективного умножения результаты качественно различаются. Согласно [8], зависимость вида (29) должна выполняться во всей дрейфовой области, так что минимальное значение концентрации $N_{\min} = \epsilon E_B^2 / 3qU_B$ достигается на границе $x = d$ (см. рисунок, a, b кривые 4). Это (как и все результаты работы [8]) следует также из (24), (25) в пределе $m \rightarrow \infty$, соответствующем приближению "критического поля". Но при конечных m оптимальный профиль вблизи границы $x = d$ (при $(m+1)(1-t) \ll 1$) имеет вид

$$N(x) = N_S \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{m+2} \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{2m+1}{m+1} \right)^{2/(m-1)} \times \sqrt{(m+1) \frac{d}{d-x}}, \quad (30)$$

т.е. граничная концентрация $N(d)$ также должна быть бесконечной в соответствии с (15).

В заключение приведем результаты расчетов сопротивления дрейфовой области при $m = 6$ для различных вариантов оптимизации, рассмотренных выше:

– оптимальная однородная дрейфовая область, (7): $r = r_0 = 0.887 \cdot r_S$;

– оптимизация в пределе критического поля, [8]: $r = r_c = 0.957 \cdot r_S$;

– оптимальная неоднородная дрейфовая область, (28): $r = r_a = 0.812 \cdot r_S$.

Величина r_c вычислялась по формуле $r_c = \frac{r_s}{2} \left(\frac{3}{2}\right)^{(m+2)/(m-1)}$. В ней учтено, что пробой дрейфовой области с профилем легирования типа (29) наступит при значении максимального поля, определяемом формулой (6), а не (2), как это предполагал автор работы [8], занижая тем самым r_c . Как видно, предложенный в [8] профиль легирования дает сопротивление даже большее, чем r_0 . Сопротивление действительно оптимальной дрейфовой области оказалось лишь на 10% меньше r_0 . Впрочем, этот последний результат применим, строго говоря, только к приборам с плоскими однородными по площади электродами (например, к диодам Шоттки). В вертикальных полевых транзисторах сопротивление может быть при прочих равных условиях заметно большим за счет растекания тока из истока, площадь которого обычно в несколько раз меньше всей площади прибора [1]. Эта часть сопротивления особенно чувствительна к проводимости материала в непосредственной близости от истока, поэтому создание найденного нами "оптимального" профиля легирования в транзисторах должно дать гораздо больший эффект, чем указано выше.

Список литературы

- [1] В.И. Балига. *Modern power devices* (Singapore, 1987) p. 154.
- [2] И.В. Грехов, Ю.Н. Сереежкин. *Лавинный пробой p-n-переходов в полупроводниках* (Л., 1980).
- [3] А.С. Кюрегян, С.Н. Юрков. ФТП, **23**, 1819 (1989).
- [4] А.С. Тагер, В.М. Валь-Перлов. *Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ* (М., Сов. радио, 1968).
- [5] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984). [Пер. с англ.: S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons, Inc. (N.Y.–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore, A Wiley-Interscience Publication, 1981).
- [6] А.А. Лебедев, В.Е. Челноков. ФТП, **33**, 1096 (1999).
- [7] K. Shenai, R.S. Scott, V.J. Baliga. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-36**, 1811 (1989).
- [8] C. Hu. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-26**, 243 (1979).
- [9] Г. Корн, Т. Корн. *Справочник по математике для научных работников и инженеров* (М., Наука, 1968). [Пер. с англ.: G.A. Korn, T.M. Korn. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers* (N.Y.–Toronto–London, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961).

Редактор Л.В. Беляков

Optimum doping profile of drift region in unipolar diodes and transistors

A.S. Kyuregyan

All-Russian Electrical Engineering Institute,
111250 Moscow, Russia

Abstract An exact analytical solution of a problem intended for minimization of drift region resistance in high voltage unipolar devices is obtained. It is shown that the optimum doping profile $N(x)$ has a minimum in central part of the drift region and increases unrestrictedly when drawing towards its boundaries.