

УДК 621.385.2 → 621.376.232.2

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ**

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ИНЖЕКЦИОННО-ПРОЛЕТНОГО ДИОДА НА ЕГО
ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Е. И. Голант, Е. В. Горбунов, А. А. Попадын, А. С. Тагер

Как было показано в предыдущей работе [1], улучшение энергетических характеристик инжекционно-пролетных диодов (ИПД) с инжекцией через $p-n$ -переход путем повышения уровня легирования активной области ограничено возникновением ударной ионизации в пролетном участке.

В ряде случаев целесообразно перейти к ступенчатому профилю легирования, при котором уровень легирования повышается лишь вблизи инжектирующего $p-n$ -перехода (структура типа $p^+ - n - i - p^+$). Теоретическому анализу таких ИПД посвящены работы [2-4], выводы которых носят несколько противоречивый характер. Так, в [2], на основе малосигнального анализа, отдается предпочтение структуре $p^- - n - p^+$, тогда как, согласно приближенным расчетам, выполненным в [3,4], энергетические характеристики лучше у ступенчатых структур. Экспериментальные данные, опубликованные в [5], подтверждают вывод о возможности увеличения КПД и отдаваемой мощности при использовании $p^+ - n - i - p^+$ -диодов. К тому же, что немаловажно, коэффициент шума возрастает всего на 1 дБ [5], несмотря на сильную неравномерность распределения концентрации примеси в активной области. Поэтому вопрос об оптимальной структуре ИПД остается до настоящего времени открытым.

**Анализ высокочастотных характеристик кремниевого $p^+ - n - i - p^+$
ИПД**

Рассматривался диод с профилем легирования, показанным на рис 1а. Такой профиль был выбран как типичный для целого класса структур типов $p^+ - n - \nu - p^+$ и $p^+ - n - \pi - p^+$, имеющих сходные характеристики. Расчет высокочастотных параметров проводился по методике, описанной в [1].

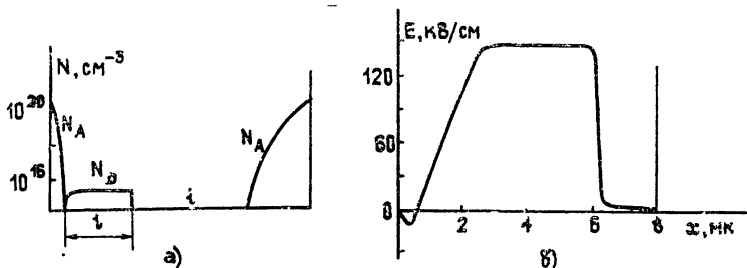


Рис. 1. Распределение концентрации примесей (а) и напряженности электрического поля в статическом режиме (б) в $p^+ - n - l - p^+$ ИПД;
 N_A, N_D — концентрации акцепторов и доноров.

Варьировалась концентрация доноров в n -области N_D , а также ее толщина, так что произведение $N_D \cdot l$ оставалось равным 10^{12} см^{-2} . При этом максимальная напряженность статического электрического поля в активной области составляла $E_{\text{max}} \approx 150 \text{ кВ/см}$. При таком поле дрейфовая скорость дырок близка к скорости насыщения, а ударная ионизация еще отсутствует. Меньшие значения E_{max} ведут к снижению как отрицательного сопротивления, так и отдаваемой мощности, а при больших значениях падает КПД и резко увеличиваются шумы.

Для каждой диодной структуры и заданных значений плотности тока питания и

частоты отдаваемая мощность P и КПД η достигают максимальной величины при определенных значениях амплитуды высокочастотных колебаний. На рис. 2 максимальные η и P в том же режиме (рассчитанные на единицу площади поперечного сечения) представлены в зависимости от уровня легирования n -области. Отметим, что эти значения P очень близки к максимальным. В отличие от случая однородного легирования, рассмотренного в [1], кривые $\eta_{\max}(N_D)$ и $P(N_D)$ имеют ярко выраженные максимумы. Такой характер кривых объясняется действием двух противоположных факторов. При увеличении N_D возрастает крутизна подъема электрического поля вблизи инжектирующего p - n -перехода (см. рис. 16), что приводит, с одной стороны, к уменьшению пути, проходимого сгустком носителей тока в области сравнительно слабого поля, где дрейфовая скорость еще невелика. Поэтому уменьшается максвелловское расплывание сгустка, а следовательно, улучшаются энергетические характеристики диода. С другой стороны, сгусток попадает в сильное поле в более раннюю фазу высокочастотного поля; это увеличивает омические потери и ухудшает активные свойства диода.

Сравнение рис. 2 с рис. 4 из [1] показывает, что по КПД и отдаваемой мощности $p^+ - n - i - p^+$ ИПД значительно превосходит диод с однородным легированием.

Однако при анализе высокочастотных свойств активных диодов нельзя ограничиться сопоставлением их энергетических характеристик. Возможность схемной реализации этих характеристик во многом определяется значением активного сопротивления. Поэтому для сравнения различных типов диодов удобно пользоваться зависимостями энергетических параметров от величины активного сопротивления. Подобные зависимости для $p^+ - n - p^+$ и $p^+ - n - i - p^+$ ИПД с близкими к оптимальным уровнями легирования приведены на рис. 3, 4, где по оси абсцисс отложено произведение активного сопротивления диода на площадь его поперечного сечения. Графики построены для двух значений плотности тока питания j_0 при частотах, также близких к оптимальным. Двухзначность зависимостей $\eta(R \cdot S)$ и $P(R \cdot S)$ для структуры $p^+ - n - i - p^+$ при $j_0 = 150 \text{ A/cm}^2$ вызвана тем, что в этом случае частота несколько меньше оптимальной по КПД и находится вблизи низкочастотной границы зоны мягкого самовозбуждения, где, как показано в [1], зависимость активной проводимости (а также сопротивления) от амплитуды высокочастотного напряжения носит немоптонный характер.

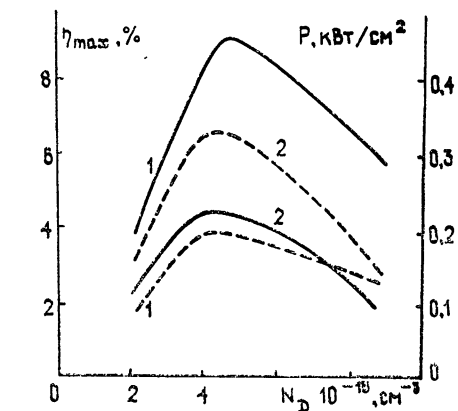


Рис. 2 Зависимости максимальных КПД и отдаваемой мощности при $f = 10 \text{ ГГц}$ от уровня легирования n -области, сплошная кривая — η_{\max} , штриховая — P ; 1 — $j_0 = 50 \text{ A/cm}^2$, 2 — $j_0 = 150 \text{ A/cm}^2$.

[1], зависимость активной проводимости (а также сопротивления) от амплитуды высокочастотного напряжения носит немоптонный характер.

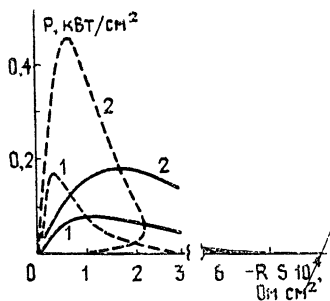


Рис. 3.

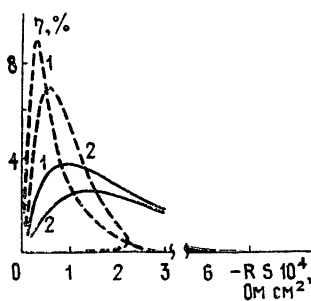


Рис. 4.

Рис. 3. Зависимости отдаваемой мощности от произведения активного сопротивления на площадь поперечного сечения диода; штриховая кривая — $p^+ - n - i - p^+$, сплошная — $p^+ - n - p^+$; 1 — $j_0 = 50 \text{ A/cm}^2$, 2 — $j_0 = 150 \text{ A/cm}^2$.

Рис. 4. Зависимости КПД от произведения активного сопротивления на площадь поперечного сечения диода; сплошная кривая — $p^+ - n - p^+$, штриховая — $p^+ - n - i - p^+$; 1 — $j_0 = 50 \text{ A/cm}^2$, 2 — $j_0 = 150 \text{ A/cm}^2$.

Как видно из рис. 3, 4, максимальные значения КПД и полезной мощности ИПД со ступенчатым профилем легирования в 2—2,5 раза больше, чем у ИПД с однородным легированием. Однако эти значения достигаются при значительно меньших величинах активного сопротивления. Поэтому преимущества $p^+ - n - i - p^+$ -диодов могут быть реализованы при достаточно низких омических потерях в диодной структуре и внешней цепи.

Если допустить, что основные потери связаны с омическим сопротивлением R_s пассивного участка структуры, и учесть, что для эффективной работы диода в схеме необходимо $R_s < 1/2 |R|$, то, пользуясь рис. 3, 4, можно оценить значение произведения толщины этого участка h на его удельное сопротивление ρ .

В диапазоне $50 < j_0 < 150 \text{ А/см}^2$ $\rho \cdot h$ не должно превышать 1,5—3,0 Ом·см², при $\rho \approx 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ это соответствует $h < 15 \div 30 \text{ мк}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Голант, А. А. Попадъин, А. С. Тагер, Изв. вузов — Радиофизика, 23, № 2, 244 (1980).
2. E. P. Eer Nisse, Appl. Phys. Lett., 20, 301 (1972).
3. H. W. Ruegg, IEEE Trans., ED-15, 577 (1968).
4. K. Kawakada, Y. Mizushima, Jap J. Appl Phys., 12, 423 (1973).
5. G. Björkman, C. P. Snapp, Electr. Lett., 8, 501 (1972).

Поступила в редакцию
7 мая 1979 г.

УДК 538.56 : 519.25

О «БЛИЗОСТИ» СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ ОДНОМЕРНЫХ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ

А. Л. Вировлянский, А. Н. Малахов

В данной работе рассматривается связь статистических характеристик двух одномерных марковских процессов $x(t)$ и $\tilde{x}(t)$, задаваемых соответственно стохастическими уравнениями

$$\dot{x} + a(x) = \xi(t)$$

и

$$\dot{\tilde{x}} + \tilde{a}(\tilde{x}) = \xi(t),$$

где $\xi(t)$ — гауссов шум с нулевым средним и функцией корреляции

$$\langle \xi(t) \xi(t') \rangle = D \delta(t - t'),$$

$a(x)$ и $\tilde{a}(x)$ — нелинейные функции. Интуитивно ясно, что если функции $a(x)$ и $\tilde{a}(x)$ мало отличаются друг от друга (количественный критерий приведен ниже), то статистические характеристики $x(t)$ и $\tilde{x}(t)$ тоже должны быть близки. Мы ставим себе задачу получить формулу для оценки этой «близости».

Отправным пунктом наших рассуждений является тот факт, что плотность вероятности переходов процессов $x(t)$ и $\tilde{x}(t)$ можно записать в виде континуального интеграла [1—4]. Здесь мы воспользуемся следующей формулой:

$$W(x, T | x_0, 0) = \exp \left\{ -\frac{1}{2D} [A(x) - A(x_0)] \right\} \int_{x_0}^x \exp \left\{ -\frac{1}{2D} \times \right. \\ \left. \times \int_0^T [x^2 + a^2(x)] dt + \frac{1}{2} \int_0^T a'(x) dt \right\} Dx(t), \quad (1)$$