

06.2;09

## Связь динамики домена с формой прикатодной "зарубки" диода Ганна

© А.И. Михайлов, Д.М. Лернер

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступило в Редакцию 1 сентября 1997 г.

В окончательной редакции 16 марта 1998 г.

Приводятся результаты математического моделирования влияния формы прикатодной "зарубки" в полупроводниковой структуре диода Ганна на особенности динамики домена. Показано, что основную роль в возникновении в спектре тока диода Ганна второй гармонической составляющей играют процессы выхода домена из "зарубки" в активную область и подхода его переднего фронта к прианодной высоколегированной области.

В настоящее время максимальные частоты генераторов Ганна с диодами из арсенида галлия  $n$ -типа ( $n$ -GaAs) при работе на основной пролетной частоте не превышают 60–70 GHz. Опыт последних лет показывает, что наиболее предпочтительным способом повышения рабочей частоты генераторов на диодах Ганна (ДГ) является выделение мощности на гармониках основной частоты [1,2]. Особенности процесса формирования домена, динамики его прохождения по активной области и ухода в анод, а в итоге и форма тока ДГ в значительной степени зависят от профиля легирования полупроводниковой структуры ДГ. Особенно сильно такая зависимость проявляется в диодах с короткими (менее  $5 \mu\text{m}$ ) длинами активной области, когда времена формирования домена и его ухода в анод становятся сравнимыми с периодом пролетных колебаний.

Характеристики диодов и генераторов Ганна в зависимости от профиля легирования изучались в ряде работ [3–10]. Большинство из них посвящено генераторам, работающим на основной частоте. И только в некоторых работах [6–10] исследовалось влияние профиля легирования на работу генераторов гармоник. Однако этот вопрос еще нельзя считать исследованным в достаточной степени.

В данной работе методом математического моделирования исследуется связь динамики носителей заряда в полупроводниковой структуре

ДГ с формой прикатодной "зарубки" — узкой прикатодной области, в которой уровень легирования понижен по сравнению с активной областью. Профиль легирования  $N_D(x)$  полупроводниковой структуры  $n^+ - n^- - n - n^+$ -GaAs ( $n^-$ -зарубка") ДГ, изображенной схематически на рис. 1, а, аппроксимировался кусочно-линейной функцией. Концентрация доноров в высоколегированных прикатодной и прианодной  $n^+$ -областях была равна  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , в активной  $n$ -области —  $3.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Уровень легирования в "зарубке"  $N_N$  (глубина "зарубки") менялся в расчетах от  $10^{15}$  до  $2.6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Ширина "зарубки"  $W$  варьировалась от 0.1 до  $1.5 \mu\text{м}$ . Указанные интервалы изменения ширины и уровня легирования в "зарубке" выбирались так, чтобы всегда реализовывался устойчивый режим пролетных колебаний. Сумма длины активной  $n$ -области и ширины "зарубки" во всех расчетах была одинаковой и равной  $3 \mu\text{м}$ , а общая длина всей полупроводниковой структуры  $L$  была равна  $5 \mu\text{м}$ . Постоянное напряжение  $U_0$  выбиралось равным 4V. С целью исключения влияния внешней схемы, а также для упрощения расчетов использовался режим короткого замыкания по переменному сигналу, т.е. напряжение на диоде считалось постоянным и равным  $U_0$ .

Расчеты были основаны на локально-полевой модели, в рамках которой для одномерного случая динамика электронов в полупроводниковой структуре описывается уравнениями непрерывности, Пуассона и полного тока:

$$q \partial n(x, t) / \partial t = -\partial j_k(x, t) / \partial x, \quad (1)$$

$$\partial E(x, t) / \partial x = q [n(x, t) - N_D(x)] / \varepsilon \varepsilon_0, \quad (2)$$

$$j(t) = j_k(x, t) + \varepsilon \varepsilon_0 \partial E(x, t) / \partial t, \quad (3)$$

где  $j_k(x, t) = qn(x, t)v(E(x, t)) - qD \partial n(x, t) / \partial x$  — плотность конвекционного тока;  $n(x, t)$  и  $q$  — концентрация и модуль заряда электрона;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $x, t$  — координата и время. Относительная диэлектрическая проницаемость GaAs  $\varepsilon = 12.5$ . Дрейфовая скорость электронов  $v(E(x, t))$  считалась локальной и мгновенной функцией напряженности электрического поля  $E = E(x, t)$  и задавалась анали-

тическим выражением

$$v(E) = \left[ \mu_a E + v_a (E/E_a)^4 \right] / \left[ 1 + (E/E_a)^4 \right], \quad (4)$$

где  $\mu_a = 9000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $v_a = 0.8 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ ;  $E_a = 3.8 \text{ kV/cm}$  — параметры аппроксимации зависимости  $v(E)$  при температуре 300 К. Коэффициент диффузии  $D$  полагался постоянным и равным  $300 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Уравнения модели аппроксимировались с помощью конечно-разностных схем и решались численно при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{aligned} n(0, t) = N_D(0); \quad n(L, t) = N_D(L); \quad \int_0^L E(x, t) dx = U_0; \\ n(x, 0) = N_D(x); \quad E(x, 0) = U_0/L. \end{aligned} \quad (5)$$

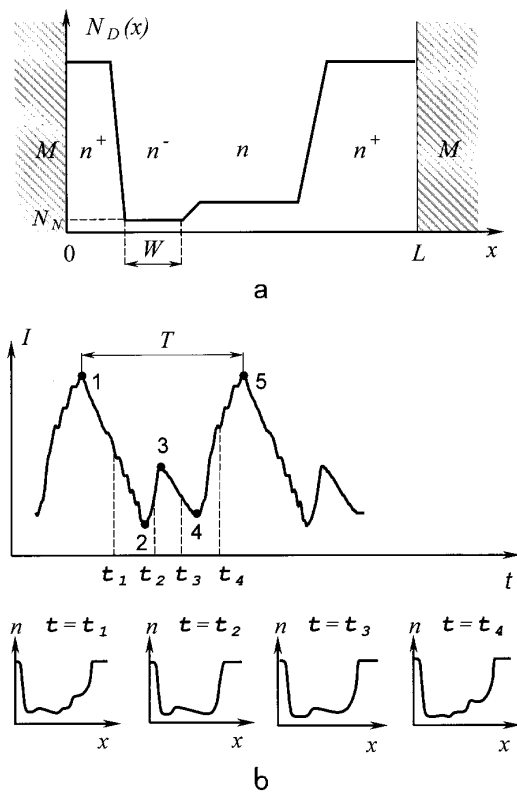
Первые два из приведенных условий моделируют контакты высоколегированных  $n^+$ -областей с металлическими контактами структуры и фактически означают, что приконтактные с металлами слои  $n^+$ -областей, непосредственно примыкающие к металлам, являются нейтральными и не имеют объемных зарядов.

Задача решалась в режиме заданного напряжения  $U_0$ . Шаги по времени и по координате выбирались из условия обеспечения математической устойчивости решения и были меньше соответствующих характеристических величин: времени максвелловской релаксации и дебаевской длины. Результаты моделирования приведены на рис. 1–2.

На рис. 1, *b* приведена форма тока  $I$ , а также распределение концентрации электронов  $n = n(x, t)$  по структуре ДГ в различные моменты времени  $t$  в течение одного периода пролетных колебаний  $T$ , полученные для глубины "зарубки"  $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  и ширины  $1 \mu\text{m}$ . Анализ динамики домена и формы тока ДГ показывает, что можно выделить следующие основные процессы, происходящие в полупроводниковой структуре ДГ в течение одного периода колебаний:

а) на "зарубке" формируется домен — ток падает (участок 1–2 на зависимости тока от времени);

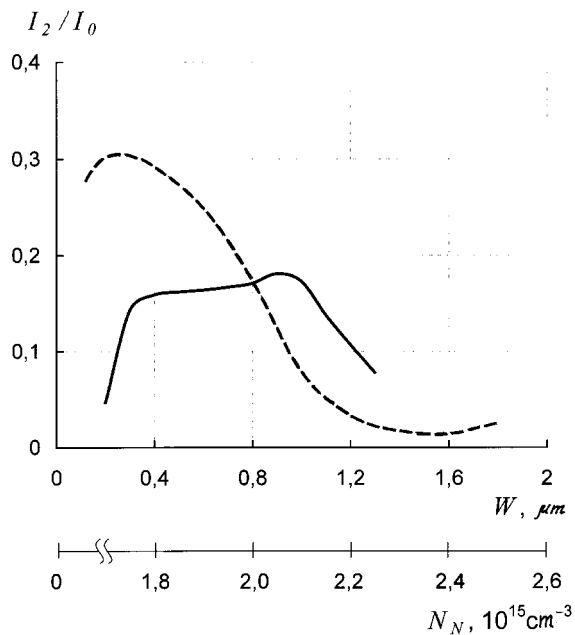
б) обогащенная электронами задняя часть домена выходит из "зарубки" в активную область с повышенной концентрацией доноров; при этом скорость тяжелых электронов возрастает, поскольку электрическое



**Рис. 1.** *a* — профиль легирования  $N_D(x)$  полупроводниковой структуры диода Ганна; *b* — форма зависимости тока  $I$  от времени  $t$  и распределение концентрации электронов в полупроводниковой структуре  $n(x)$  диода Ганна в моменты времени  $t = t_1, t_2, t_3, t_4$ .

поле в активной области ниже, чем в "зарубке", и, следовательно, ток увеличивается (участок 2–3);

в) при подходе обедненной электронами части домена к прианодной высоколегированной  $n^+$ -области происходит процесс перераспределения поля в структуре ДГ и его увеличения в активной  $n$ -области, что приводит в итоге к некоторому падению тока (участок 3–4);



**Рис. 2.** Зависимости относительной амплитуды второй гармонической составляющей тока  $I_2/I_0$  от ширины  $W$  и от глубины  $N_N$  "зарубки": сплошная линия — зависимость  $I_2/I_0$  от  $W$  при  $N_N = 2 \cdot 10^{15} cm^{-3}$ ; пунктирная линия — зависимость  $I_2/I_0$  от  $N_N$  при  $W = 1 \mu m$ .

г) при уходе обогащенной электронами части домена в прианодную высоколегированную  $n^+$ -область ток увеличивается до главного максимума (участок 4–5).

Далее все описанные процессы повторяются.

Анализ показал, что возникновение второй гармонической составляющей тока непосредственно связано с динамическими процессами в структуре ДГ, ответственными за появление на зависимости  $I$  от  $t$  локального максимума на участке 2–3–4, т.е. с выходом домена из "зарубки" и началом ухода его переднего фронта в анод.

На рис. 2 приведены зависимости относительной амплитуды второй гармонической составляющей тока ДГ от ширины (сплошная линия)

и глубины (пунктир) прикатодной "зарубки". Из приведенных выше рассуждений следует, что при малой глубине "зарубки", а следовательно при малом различии между величиной поля в ней и в активной области, скорость тяжелых электронов в задней обогащенной части домена при выходе в активную область возрастает меньше, чем при большой глубине. Поэтому амплитуда второй гармоники, обусловленной процессом выхода домена в активную область, растет с увеличением глубины "зарубки". При больших глубинах наблюдается спад амплитуды второй гармоники, поскольку происходит переход к режиму со статическим доменом у катода и пролетные колебания прекращаются.

При изменении ширины "зарубки" разность между величиной поля в ней и в активной области меняется слабо. Однако с уменьшением ширины наблюдается переход к режиму со статическим доменом у анода, вследствие чего амплитуда второй гармоники падает. При увеличении ширины "зарубки" может наступить момент, когда длина домена и длина активной области становятся приблизительно одинаковыми и процесс выхода обогащенной части домена из "зарубки" может происходить практически одновременно с началом ухода его переднего фронта в анод. Совмещение по времени этих двух процессов приводит к снижению амплитуды второй гармоники. Как показало моделирование, для полупроводниковых структур с выбранными размерами и легированием максимальное значение относительной амплитуды второй гармоники наблюдается, когда ширина "зарубки" составляет приблизительно половину от длины активной области.

Таким образом, оптимальная форма "зарубки" для диодов Ганна, используемых в генераторах с выходом на второй гармонике, должна выбираться с учетом по крайней мере двух следующих соображений. Во-первых, "зарубка" должна быть достаточно "глубокой" для того, чтобы обеспечить как можно больший перепад электрического поля при переходе из "зарубки" в активную область. При этом глубина не должна быть настолько большой, чтобы происходил переход к режиму со статическим доменом у катода. И во-вторых, ширина "зарубки" должна выбираться, с одной стороны, не слишком малой, чтобы не происходил переход к режиму со статическим доменом у анода, а с другой стороны, чтобы она составляла не более половины от длины активной области ДГ, поскольку при большей ширине возможно совмещение по времени процесса ухода обедненной части домена в анод и процесса выхода его обогащенной части в активную область.

## Список литературы

- [1] *Васильев Н.А., Лукаш В.С., Муравьев В.В.* и др. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28. № 10. С. 42–50.
- [2] *Косов А.С., Еленский В.Г.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 2. С. 54–65.
- [3] *Пореш С.Б., Тагер А.С., Кальфа А.А.* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1976. В. 10. С. 19–31.
- [4] *Кальфа А.А., Конопляников С.Н., Пореш С.Б.* и др. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 7. С. 1359–1362.
- [5] *Аркуша Ю.В., Попов А.М., Прохоров Э.Д.* // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. В. 7. С. 1552–1553.
- [6] *Ondria J., Ross R.I.* // SBMO Int. Microwave Symp. Proc., Rio de Janeiro, July 27–30, 1987; Gathering World Through Microwaves. V. 1. San Paulo, 1987. С. 173–178.
- [7] *Михайлов А.И., Панфилов В.Б.* // Взаимодействие электромагнитных волн с твердым телом: Труды III Всесоюз. школы-семинара. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1991. С. 132.
- [8] *Михайлов А.И., Панфилов В.Б.* // Семинар "Нелинейные высокочастотные явления в полупроводниках и полупроводниковых структурах и проблемы их применения в электронике СВЧ". Тез. докл. Навои, 1991. С. 52.
- [9] *Михайлов А.И., Панфилов В.Б.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1992. Т. 35. № 1. С. 76–80.
- [10] *Зубович Н.А., Цвирко Ю.А.* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1990. В. 1. С. 31–35.