

*Мартынов Я.Б., Новиков С.И., Пашковский А.Б.  
АО «НПП «Исток» имени Шокина»*

## **Особенности нелокального разогрева носителей тока в полевых транзисторах на основе алмаза**

*Представлены результаты теоретических исследований нелокального разогрева дырок в полевых транзисторах на основе алмаза. Исследованы особенности всплеска дрейфовой скорости дырок в зависимости от фундаментальных параметров материала, и некоторых геометрических параметров транзистора. Показано, существенное влияние на высокочастотные свойства транзисторов неоднородности поля в канале прибора.*

**Ключевые слова:** Полевой транзистор, широкозонные материалы, всплеск дрейфовой скорости.

Одним из новых перспективных материалов для полевых транзисторов является алмаз. Среди широкозонных материалов алмаз имеет вторую по величине ширину запрещенной зоны (5.5 эВ, в пять раз большую, чем у кремния); пробивное напряжение в 30 раз большее, чем у кремния, в три раза большее, чем у SiC и GaN. Алмаз имеет наибольшую теплопроводность, в 10 раз большую, чем у GaN и в четыре раза большую, чем у SiC. По величине критерия качества, построенного с учетом этих физических свойств, алмаз далеко превосходит остальные широкозонные полупроводниковые материалы [1]. Появляющиеся в последнее время работы показывают, что технологии выращивания алмаза и создания на нем транзисторных структур постепенно преодолевают детские болезни, связанные с большой плотностью состояний, возникающих на дефектах структуры [2]. К настоящему времени разработана технология создания акцепторных слоев с поверхностной концентрацией  $>10^{13}\text{см}^{-3}$ , позволяющих создавать полевые транзисторы, в которых носителями тока являются дырки [3]. Дырки в алмазе имеют несколько меньшую, чем электроны максимальную статическую дрейфовую скорость ( $1.1 \cdot 10^7$  см/с против  $1.5 \cdot 10^7$  см/с) [4] (рис.1) и немного меньшую подвижность. Существует достаточно много способов оценки быстродействия транзисторов от простых критериев качества и оценок по статическим параметрам материалов [1] до расчета транзисторов с помощью достаточно сложных моделей [5,7]. В настоящей работе показано, что на быстродействие полевого транзистора на алмазе с дырочным типом проводимости оказывают влияние не только подвижность носителей тока и величина всплеска их дрейфовой скорости, но и особенности развития этого всплеска, связанные с неоднородностью поля под затвором прибора.

Для описания динамики электронов использовалась широко распространенная модель [5]:

$$v \frac{\partial m^* v}{\partial x} = qE - \frac{m^*(\varepsilon)v}{\tau_p(\varepsilon)},$$

$$v \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = qEv - \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\tau_\varepsilon(\varepsilon)},$$
(1,2)

где  $q$ ,  $v$ ,  $m^*$ ,  $\varepsilon$  – заряд, скорость, эффективная масса и энергия носителей тока соответственно,  $E$  – напряженность электрического поля, а времена релаксации [5]:

$$\tau_p(\varepsilon) = \frac{m^*(\varepsilon) v_s(\varepsilon)}{q E_s(\varepsilon)} \quad (3,4)$$

$$\tau_\varepsilon(\varepsilon) = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{q E_s(\varepsilon) v_s(\varepsilon)}$$

Здесь и далее  $v_s(\varepsilon)$ ,  $E_s(\varepsilon)$  – статические значения дрейфовой скорости носителей тока и напряженности электрического поля, соответствующие данной энергии  $\varepsilon$ , получаемые из расчетов методом Монте-Карло [8] статических характеристик материалов.

Данная модель удобна как для расчёта отклика на ступеньку электрического поля [5,9], так и для описания динамики электронов непосредственно в канале полевого транзистора [10,11].

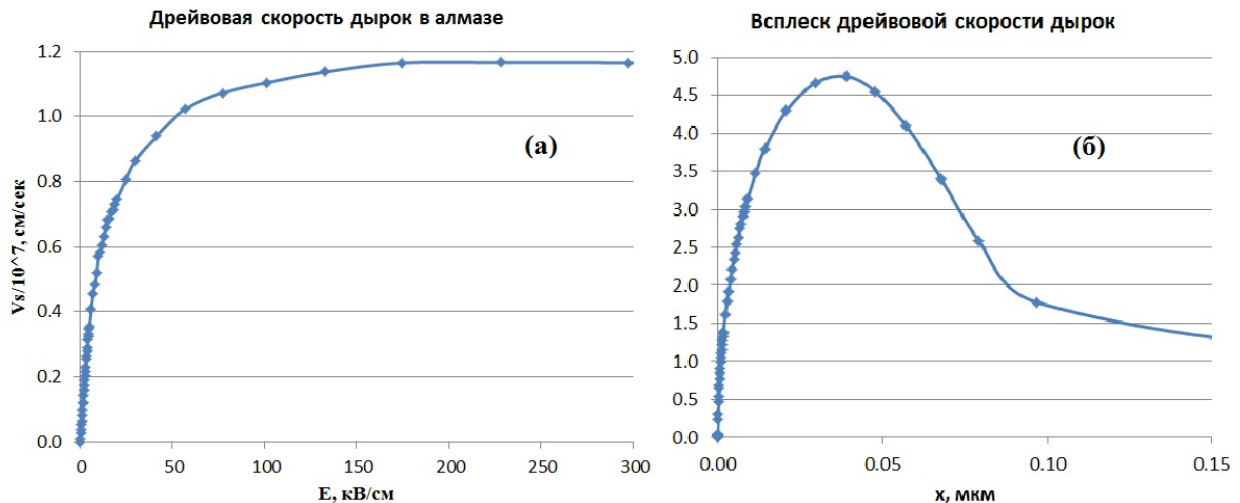


Рис. 1. Рассчитанная [8] статическая дрейфовая скорость дырок в алмазе (а) и рассчитанный по (1-4) всплеск дрейфовой скорости дырок в алмазе при влете в область сильного электрического поля с напряженностью 400 кВ/см (б).

Вначале, с помощью уравнений (1-4) предельная частота усиления по току ( $F_T$ ) транзистора с длиной затвора  $Lg$  оценивалась путем расчета времени пролета ( $\tau$ ) носителями тока области полупроводника определенной длины ( $Lg$ ) с постоянным полем:  $F_T = 1/(2\pi\tau)$ . Величина  $F_T$  для транзисторов с достаточно большой длиной затвора, как известно [12], вначале растет с ростом величины электрического поля, а затем падает. Для транзисторов же с малой длиной затвора в некоторых материалах такого максимума нет (прибор работает в режиме близком к баллистическому) и величина  $F_T$  ограничена лишь максимально возможной в данном материале напряженностью электрического поля. Дырки в алмазе имеют достаточно высокую максимальную статическую дрейфовую скорость, а также довольно высокий, но, правда, короткий, всплеск дрейфовой скорости при влете в область с высоким полем (рис.1). Сочетание этих параметров показывает, что подобный транзистор выдерживает конкуренцию с транзисторами на других широкозонных материалах. На рисунке 2 приведена рассчитанная указанным способом зависимость  $F_T(Lg)$  для алмаза с дырочным типом проводимости. А также проведено сравнение различных полупроводниковых материалов по рассчитанной указанным выше способом величине  $F_T$ .

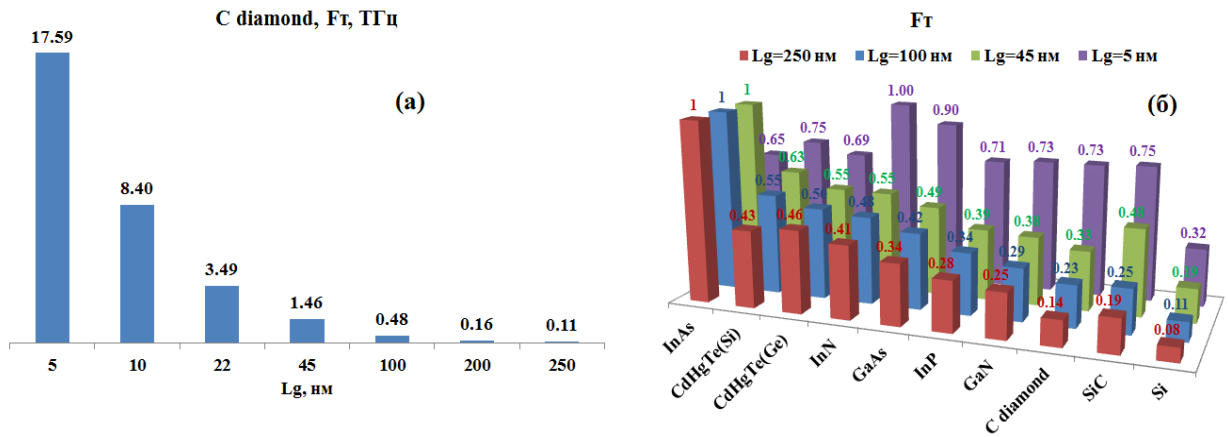


Рис. 2. Зависимость предельной частоты усиления по току от длины пролетного участка для алмаза с дырочным типом проводимости (а) и сравнение по этой величине ряда полупроводниковых материалов (б). В материале CdHgTe(Si) величина мольной доли ртути обеспечивает такую же ширину запрещенной зоны этого материала, как и у кремния, а в CdHgTe(Ge)- такую же ширину запрещенной зоны, как и у германия.

Простая модель показывает в частности (рис.2), что уменьшение размера пролетного участка до 45 нм и менее позволит транзистору на алмазе с дырочным типом проводимости достичь терагерцового диапазона.

Для проверки этого предположения были проведены расчеты по более строгой квазиодномерной модели транзистора [11] рис.3. Результаты оказались существенно отличающимися. При коротких затворах алмаз с дырочной проводимостью существенно уступает по быстродействию приборам на других материалах, в том числе и широкозонных. Обусловлено это как раз особенностями динамики горячих носителей.

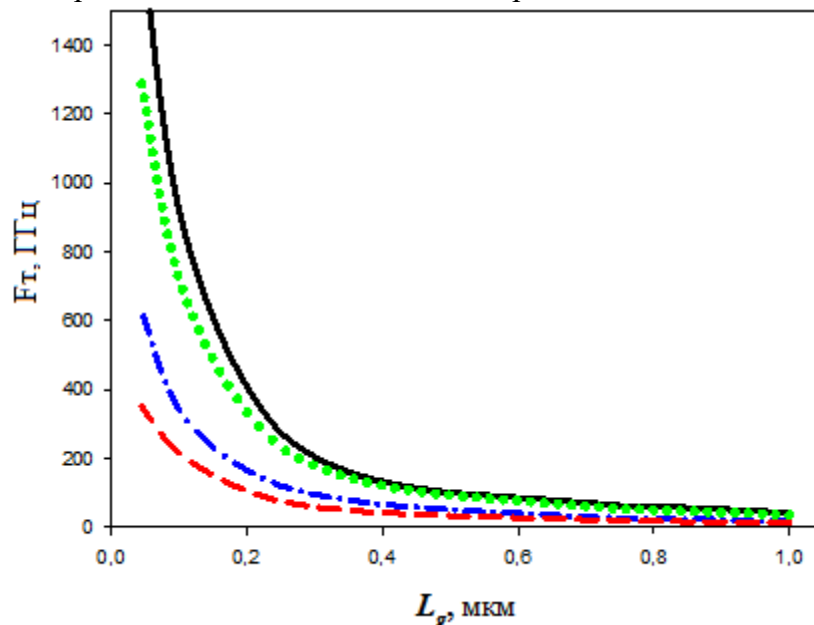


Рис. 3. Зависимость максимальной частоты усиления по току от длины затвора моделируемого транзистора. GaAs (—)  $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , алмаз (- - -)  $\mu = 500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , GaN (- · - · -)  $2300 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , InN (·····)  $\mu = 6500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

На рис.4 приведены распределения дрейфовой скорости носителей под затвором транзистора для приборов из различных материалов при длине затвора 0.1 мкм. Видно, что

дрейфовая скорость дырок в транзисторе на основе алмазе гораздо ниже, чем в других приборах, несмотря на очень высокую величину всплеска дрейфовой скорости. По этому показателю алмаз сравним с арсенидом галлия, и в том и в другом максимальная величина дрейфовой скорости под затвором превосходит максимальное статическое значение примерно в 4 раза, однако сама величина максимальной статической скорости в GaAs почти в 2 раза выше -  $2.2 \cdot 10^7$  см/с для электронов в GaAs против  $1.16 \cdot 10^7$  см/с для дырок в алмазе. (Заметим, что максимальная статическая скорость электронов в алмазе  $1.5 \cdot 10^7$  см/с). Однако, быстрое падение подвижности с ростом поля, высокие поля, при которых происходит насыщение, и высокая эффективная масса носителей приводят к тому, что в большей части области дрейфовая скорость дырок в алмазе невелика. Кроме того, максимальное быстродействие для алмазного транзистора достигается при весьма больших напряжениях на стоке (в данном случае 10 В), что приводит к очень высоким напряжённости электрических полей под затвором и сильным краевым эффектам, заметно снижающим быстродействие.

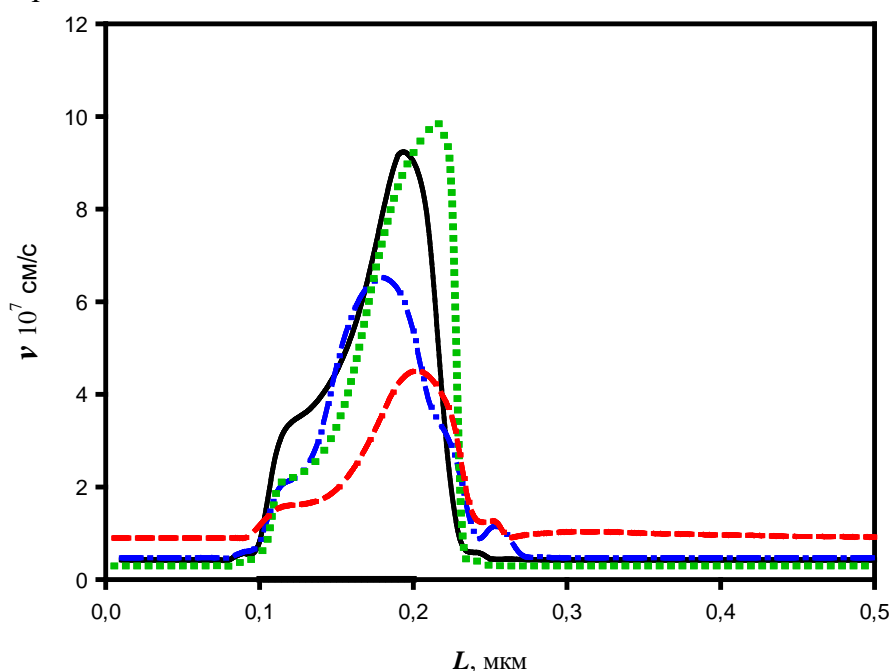


Рис. 4. Распределения дрейфовой скорости электронов в каналах транзисторов на GaAs (—)  $\mu = 8000$  см<sup>2</sup>/В·с, GaN (-.-.-)  $2300$  см<sup>2</sup>/В·с, InN (.....)  $\mu = 6500$  см<sup>2</sup>/В·с и дырок в канале транзистора на алмазе (- - - -)  $\mu = 500$  см<sup>2</sup>/В·с. Координаты затвора: (0.1,0.2).

Совокупность этих особенностей и приводит к заметно более низкому быстродействию данного прибора. Надо отметить, что по сути дела в данной традиционной конструкции не удастся реализовать большинство преимуществ алмаза. По-видимому, для этого необходимо радикальное изменение конструкции, например, введение самосовмещённого затвора (как в р-і-р транзисторе [13] (рис.5)) для уменьшения краевых эффектов или введение гетероинжектора, для реализации всех возможных преимуществ от довольно большого всплеска дрейфовой скорости. Кроме того, следует продолжать усилия по реализации транзистора на алмазе с электронным типом проводимости.

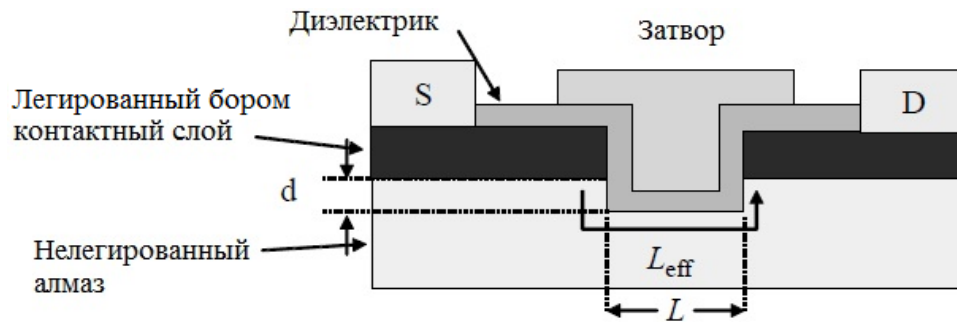


Рис. 5. Возможная конструкция p-i-p полевого транзистора с изолированным затвором.

#### Библиографический список

1. B. J. Baliga, Power Semiconductor Device Figure of Merit for High-Frequency Applications, IEEE Electron Device Lett. EDL-10, 1989, P. 455-457.
2. R.K. Willardson (ed) Semiconductors and Semimetals V.77 C.E. Nebel (ed) Thin-Film Diamond II, Elsevier, 2004.
3. K. Hayashi, S. Yamanaka, H. Okushi, and K. Kajimura, Study of the effect of hydrogen on transport properties in chemical vapor deposited diamond films by Hall measurements, Appl. Phys. Lett. 68, 1996, P.376.
4. F. Nava and C. Canali Transport properties of natural diamond used as nuclear particle detector for a wide temperature range, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-26, No. 1, February 1979, P.308-315.
5. M.Shur Influence of Nonuniform Field Distribution on Frequency Limits of GaAs Field-Effect Transistors // Electronics Letters. 1976, V.12, № 23, P.615-616.
6. R. J. Trew, J. B. Yan, and P. M. Mock, The Potential of Diamond and SiC Electronic Devices for Microwave and Millimeter-Wave Power Applications, Proc. IEEE 79, 1991, P.598.
7. Г. З. Гарбер, А. А. Дорофеев, А. М. Зубков, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой, К. Н. Зяблюк, А. Ю. Митягин, Н. Х. Талипов, Г. В. Чучева О проблеме создания сверхвысокочастотных мощных полевых транзисторов на основе алмаза, Радиотехника и электроника, 2014, том 59, № 4, С. 411-416
8. А.В.Гарматин Программа моделирования методом Монте-Карло нестационарных процессов разогрева электронов электрическим полем в полупроводниках, Электронная техника Сер.1. Электроника СВЧ, 1985 № 3 (377). С.66.
9. В. Е. Foutz, S. K. O'Leary, M. S. Shur, L. F. Eastman Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN// J. Appl. Phys. 1999, v.85, №11, 7727-7734.
10. A.Cappu, B.Carnez, R.Fauquembergues, G.Salmer, E.Constant Comparative Potential Performance of Si, GaAs, GaInAs, InAs Submicrometer-Gate FET,s // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980, v.27, № 11, P.2158-2160.
11. А.Б.Пашковский., В.М.Лукашин, Я.Б.Мартынов, В.Г.Лапин, А.А.Капралова, И.А.Анисимов "Нелокальный дрейф электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия"// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2014, В.4(523), С. 5- 16.
12. А.В.Гарматин, А.А Кальфа, А.С. Тагер Влияние электрического поля на частотный предел полевых транзисторов из GaAs и InP, Радиотехника и электроника, Т. XXVII, 1982, С. 617-619.
13. Kawakami, N., Yokota, Y., Tachibana, T., Hayashi, K., Kobashi, K. 2005 Device operation of p-i-p type metal-insulator-semiconductor field effect transistors with sub-micrometer channel, Diamond Relat. Mater. 14, 2004, P.509-513.