

Особенности нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе различных полупроводниковых материалов

Представлены результаты теоретических исследований нелокального разогрева электронов в полевых транзисторах на основе различных полупроводниковых материалов. Исследованы особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в зависимости от фундаментальных параметров материалов, и соответственно зависимостей времен релаксации от энергии. Показано, что наибольшее влияние на быстродействие транзисторов оказывают две величины: оптического фонона и эффективной массы электрона в нижней энергетической долине. Сравнение проводилось как для ряда традиционных полупроводниковых материалов, таких как GaAs, InAs, GaN, SiC, алмаз, так и для некоторых материалов, обычно не применяемых для полевых транзисторов, таких как InN, CdHgTe.

Ключевые слова: полевой транзистор, широкозонные материалы, всплеск дрейфовой скорости.

Задача поиска новых перспективных материалов встала практически с момента создания первых полевых транзисторов. Существует достаточно много подробных исследований в этой области, причём как с использованием моделирования конкретно транзистора [1], так и оценок просто по статическим параметрам материалов [2]. Особую актуальность эти исследования приобретают как с бурным развитием индустрии широкозонных материалов, так и с появлением в последние годы новых перспективных путей улучшения, существующих гетероструктур [3, 4]. Попытки оценки перспективности применения различных материалов просто по статическим зависимостям дрейфовой скорости от напряженности электрического поля или другим наборам параметров, тоже делались неоднократно, но как показывают результаты сравнения различных материалов при расчёте транзисторов, на выходные характеристики прибора определяющее влияние оказывают не только статические зависимости $v(E)$ и величина всплеска дрейфовой скорости электронов под затвором транзистора, но и особенности развития всплеска дрейфовой скорости электронов [5].

Поэтому представляет интерес теоретически сравнить различные полупроводниковые материалы для перспективных сверхвысокочастотных полевых транзисторов с учетом влияния нелокального разогрева электронов в сильных электрических полях и исследовать особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в зависимости от фундаментальных параметров материалов. Для описания динамики электронов использовалась широко распространенная модель [6]:

$$v \frac{\partial m^* v}{\partial x} = qE - \frac{m^*(\varepsilon)v}{\tau_p(\varepsilon)}, v \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = qEv - \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\tau_\varepsilon(\varepsilon)}, \quad (1, 2)$$

где q , v , m^* , ε – заряд, скорость, эффективная масса и энергия электронов соответственно, E – напряженность электрического поля. Времена релаксации [6]:

$$\tau_p(\varepsilon) = \frac{m^*(\varepsilon) v_s(\varepsilon)}{q E_s(\varepsilon)}, \tau_\varepsilon(\varepsilon) = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{q E_s(\varepsilon) v_s(\varepsilon)}. \quad (3, 4)$$

Здесь и далее $v_s(\varepsilon)$, $E_s(\varepsilon)$ – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие данной энергии ε , получаемые из расчетов методом Монте-Карло [7] статических характеристик материалов.

Данная модель удобна как для расчёта отклика на ступеньку электрического поля [2,6], так и для непосредственного описания динамики электронов в канале полевого транзистора [1,5].

Вначале материалы сравнивались по времени пролета электронов области полупроводника определенной длины с высоким полем. Показано, что наибольшее влияние на быстродействие транзисторов оказывают две величины: оптического фонона и эффективной массы электрона в нижней энергетической долине. Большой оптический фонон приводит к росту максимально возможной величины стационарной дрейфовой скорости электронов, при этом уменьшая величину времени релаксации по энергии. Малое время релаксации по энергии снижает как величину всплеска, так и его длительность. Меньшая эффективная масса электрона увеличивает величину времени релаксации по энергии. При этом растет как абсолютная величина всплеска, так и его длительность. Сравнение проводилось как для ряда традиционных полупроводниковых материалов, таких как GaAs, InAs, GaN, SiC, алмаз, так и для некоторых материалов, обычно не применяемых для полевых транзисторов, таких как InN, CdHgTe. Рассмотренные материалы разбились на три группы (рис.1). Наиболее выгодное сочетание величин эффективной массы и оптического фонона имеет InAs. Во вторую группу входят GaAs, InN, CdHgTe. Третью группу образуют широкозонные материалы с наибольшей эффективной массой GaN, SiC, алмаз.

Дальнейшее сравнение материалов проводилось путем расчета максимальной частоты усиления по току для простейшей транзисторной структуры со ступенчатым профилем легирования толщиной 18 нм, состоящем из двух слоев: слоя под затвором толщиной 15 нм и концентрацией доноров 10^{18} см^{-3} и слоя у буфера толщиной 3 нм и концентрацией доноров $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эта структура является довольно грубым аналогом реальной гетероструктуры и берется исключительно для того, чтобы избежать подбора гетеропары для полупроводников, для которых такая пара еще не известна и, с другой стороны, рассматривать электронный транспорт во всех полупроводниках по возможности в одинаковых условиях.

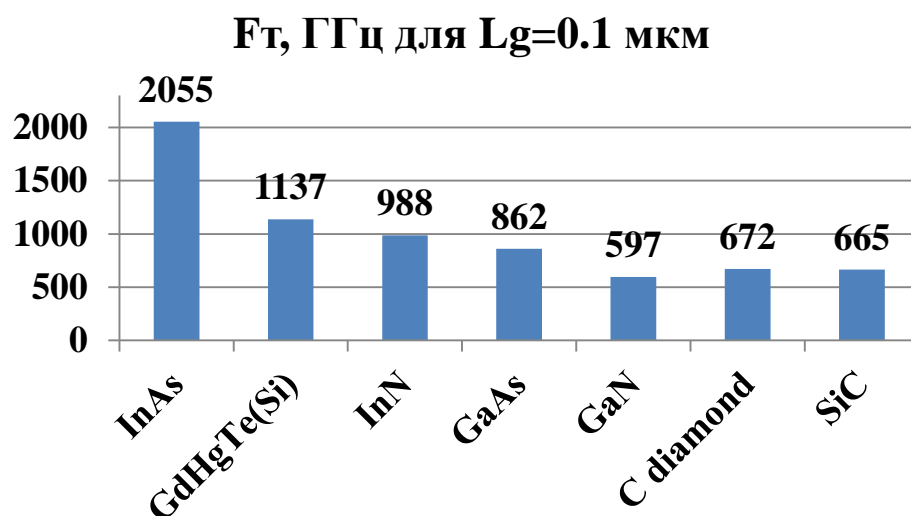


Рисунок 1. Сравнение материалов по времени пролета τ области с сильным полем длиной 0.1 мкм. $F_T=1/(2\pi\tau)$. Подбиралась оптимальная величина ступеньки поля.

Результаты расчета максимальной частоты усиления по току f_t для транзисторов на таких структурах приведены на рис.2 (выбирался режим питания прибора, при котором для данной длины затвора f_t была максимальна).

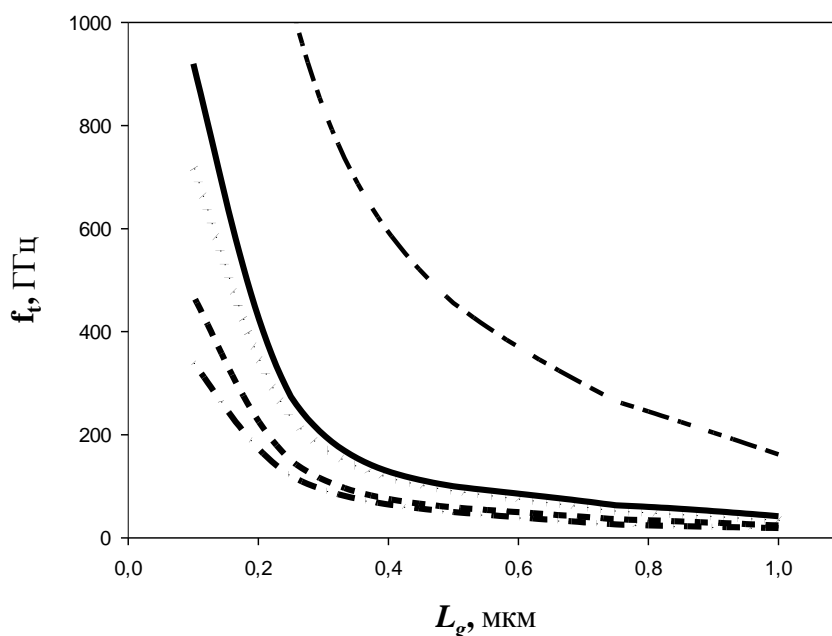


Рисунок 2. Зависимость максимальной частоты усиления по току от длины затвора моделируемого транзистора. GaAs (—) $\mu = 8000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, (- - -) $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, GaN (— · — · —) $2300 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, InN (·····) $\mu = 6500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, InAs (— - —) $\mu = 32000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Видно, что в приборах на основе GaAs даже при $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ максимальная частота усиления по току несколько больше, чем в приборах на основе GaN. При подвижности соответствующей чистому материалу разница становится весьма заметной (более чем в 2 раза при больших, и почти в 3 раза при малых длинах затвора), что явно противоречит простым оценкам по сравнению зависимостей от поля статических скоростей электронов в этих материалах. Аналогична картина наблюдается и при сравнении InN с чистым GaAs (максимальные частоты усиления близки). Это легко понять, если рассмотреть результаты расчетов для распределения дрейфовой скорости по длине канала моделируемого транзистора, которые приведены на рис. 3(а).

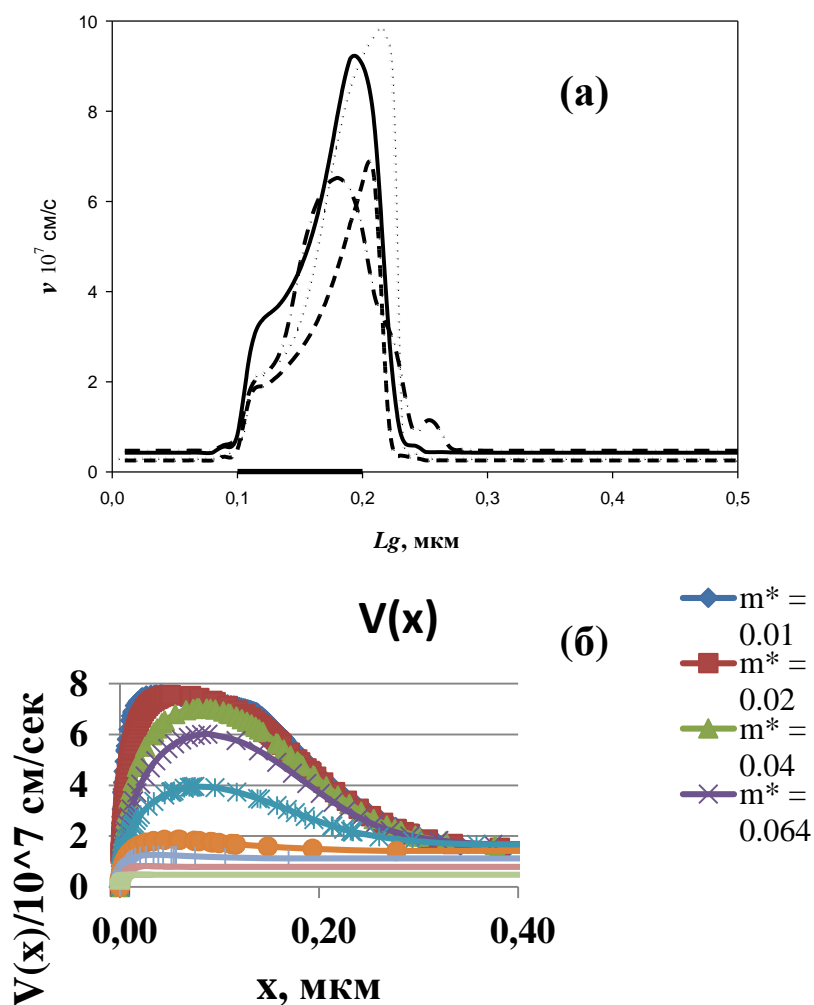


Рисунок 3. Распределения дрейфовой скорости электронов в каналах GaAs (—) $\mu = 8000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (- - -) $\mu = 1700 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и GaN (— · — · —) $2300 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, InN (·····) $\mu = 6500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ транзисторов. Координаты затвора: 0.1, 0.2 (а). Зависимость всплеска дрейфовой скорости от величины эффективной массы электрона при влете в однородное поле в $20 \text{ кВ}/\text{см}$ для материала типа GaAs (б).

Видно, что при влёте под затвор, в канале GaAs транзистора электроны сразу разгоняются до скоростей, существенно превосходящих максимальное статическое значение и далее их скорость продолжает заметно увеличиваться. В максимуме дрейфовая скорость электронов в несколько раз превосходит свое максимальное статическое значение как при высокой, так и при низкой подвижности. Это происходит потому, что большая эффективная масса не позволяет электронам в GaN и InN разгоняться до таких же скоростей как электроны в GaAs (рис.3 (б)). Видно, что при той же величине оптического фона величина всплеска дрейфовой скорости электронов уменьшается с ростом их эффективной массы. В нитриде галлия к тому же оптический фонон в несколько раз больше по сравнению с фононом GaAs. Это еще больше уменьшает величину всплеска и сокращает его длительность. К тому же GaN имеет большее пороговое поле, а всплеск дрейфовой скорости возникает при влете в поле, превышающее пороговое, когда из-за конечности времени релаксации по энергии (времени перехода в верхние долины с большей массой) электроны движутся в сильном поле, но в нижней долине и с малой эффективной массой. Поэтому в GaN транзисторе размер области канала, где электроны движутся без всплеска скорости заметно больше, чем в арсенид галлиевом транзисторе. Надо отметить, что наибольшей эффективной массой и наибольшим оптическим фононом обладает алмаз. Однако, величина всплеска дрейфовой скорости для него оказывается достаточно большой и этот материал лидирует в группе широкозонных полупроводников (рис.1). Большой всплеск объясняется тем, что алмаз является неполярным полупроводником и поэтому константа взаимодействия между электронами и оптическими фононами в нем минимальна.

Библиографический список

1. 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..
2. 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.
3. В.М. Лукашин, А.Б.Пашковский, К.С.Журавлев, А.И.Торопов, В.Г.Лапин, А.Б.Соколов “Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов” Письма в ЖТФ, 2012, т.38., в. 17, стр. 84-89.
4. Д.С. Пономарев, И.С. Василевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, В.А. Кульбачинский, Н.А. Юзева «Подвижность и эффективная масса электронов в составных квантовых ямах InGaAs с нановставками InAs и GaAs», Физика и техника полупроводников, т. 46, вып. 4, с. 500-506, 2012.
5. 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.
6. M.Shur Influence of Nonuniform Field Distribution on Frequency Limits of GaAs Field-Effect Transistors // Electronics Letters. 1976, V.12, № 23, P.615-616.
7. 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.