

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. А. Клименко

## Влияние междолинного переноса электронов на эффективность генерации диодов с туннельными границами на основе GaAs

(Представлено академиком НАН Украины В. М. Яковенко)

*Исследованы вольт-амперные характеристики и эффективность генерации диодов с туннельными границами в структурах типа “сэндвич” на основе GaAs. Показано, как влияет междолинный перенос электронов в областях, прилегающих к туннельной границе, на эффективность генерации диодов в диапазоне частот.*

Исследуются диоды, в которых при определенных напряжениях между омическими контактами возникает отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП), в основном, за счет туннелирования электронов через боковые границы диода [1, 2].

Диод с туннельной границей (ТГ) в варианте “сэндвич” показан на рис. 1. Между анодом и катодом (А-К) протекает ток  $I_{A-K}$ . Напряжение между А-К таково, что туннельный  $n^+ - p^+$  переход (переход резкий с толщиной 100–150 Å, в котором туннельная составляющая тока намного больше диффузионно-дрейфовой [3, 4], включен в прямом направлении).  $P^+$ -область ТГ соединена с анодом. Суммарный ток через  $n^+ - p^+$  переход —  $I_{ТГ}$ . При увеличении напряжения на диоде  $U$  токи  $I_{ТГ}$  и  $I_{A-K}$  возрастают до тех пор, пока ток ТГ не достигнет максимального значения. При дальнейшем увеличении напряжения ток ТГ резко уменьшается, что приводит к уменьшению тока между А-К диода. При последующем увеличении напряжения  $U$  ток  $I_{ТГ}$  возрастает [1, 2].

Ток  $I_{A-K}$  определяется зависимостью скорость–поле материала, на основе которого выполнен диод (это могут быть Ge, Si, GaAs и др.) Ток  $I_{A-K}$  может расти, если напряженность электрического поля меньше пороговой, будет насыщаться, если напряженность

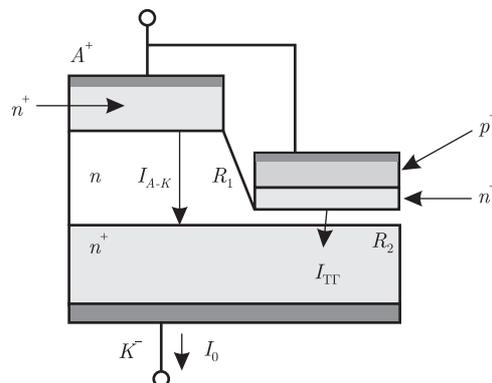


Рис. 1. Структура типа “сэндвич” на сильнолегированной подложке  $n^+$ -GaAs при прямом включении ТГ

электрического поля больше пороговой (например в Ge, Si), или уменьшаться при напряженностях электрического поля выше пороговой, как в GaAs. В последнем случае в промежутке А-К возникает ОДП за счет междолинного переноса электронов (МПЭ). Таким образом, диод катод–анод  $n^+ - n - n^+$  с боковыми границами в виде  $n^+ - p^+$  перехода обладает ОДП вследствие туннелирования через ТГ [5] и МПЭ между А-К [6].

Ниже исследуются влияние МПЭ на характеристики таких диодов и эффективность их генерации в диапазоне частот.

**Методика расчетов.** Эквивалентная схема такой структуры представляет собой проводимость ТГ, параллельно которой включена емкость ТГ–С. Последовательно с ТГ включено сопротивление  $R_2$ , состоящее из сопротивления потерь  $R_s$  и сопротивления между ТГ и катодом. Емкость А-К намного меньше емкости ТГ ( $l_1 \gg l_2$ ,  $l_1$  – расстояние между А-К,  $l_2$  – расстояние между ТГ и катодом). Сопротивление  $R_1$  (сопротивление А-К) включено параллельно ТГ и  $R_2$ . С увеличением частоты существенную роль будет играть емкостное сопротивление  $Z_c = 1/\omega C$ , которое включено параллельно активной проводимости ТГ.

Сопротивления зависят от приложенного напряжения к диоду, поскольку в материалах этих сопротивлений подвижность и дрейфовая скорость зависят от напряженности электрического поля и различны для Ge, Si, GaAs.

Отсюда следуют два случая:

1) диод выполнен на полупроводниках с зависимостями  $v(E)$  без ОДП, тогда его вольт-амперные характеристики (ВАХ), энергетические и частотные характеристики определяет ТГ (Ge, Si);

2) диод выполнен на основе полупроводника с зависимостью  $v(E)$ , имеющей участок ОДП, и тогда его энергетические и частотные характеристики будут определяться не только ТГ, но и МПЭ в области А-К.

Рассмотрим эти случаи.

1. Если диод выполнен на основе полупроводников с зависимостями  $v(E)$  без ОДП (Ge, Si и др.), то сопротивления равны:

$$R_1(U) = \frac{U}{enSv(U/l_1)}, \quad R_2(U_2) = \frac{U_2}{enSv(U_2/l_2)}. \quad (1)$$

Отметим, что  $R_2 \ll R_1$ , падение напряжения на нем мало, можно полагать  $R_2$  постоянным при приложенных к нему напряжениях  $U_2 \ll U_p$ . В этом случае ограничения тока  $I_{ТГ}(U)$  из-за насыщения дрейфовой скорости через  $R_2$  не происходит.

С увеличением частоты через сопротивление  $R_2$  будет протекать не только ток проводимости ТГ, но и ток через емкостное сопротивление. Тогда ток  $I_2$ , протекающий через сопротивление  $R_2$ , определяется из трансцендентного уравнения

$$I_2(U) = \frac{U - I_2 R_2}{Z_c} + I_{ТГ}(U - I_2 R_2). \quad (2)$$

Уравнение для ВАХ диода с ТГ запишется в виде

$$I_0(U) = I_2(U) + enSv(U/l). \quad (3)$$

Решая уравнения (2), (3), получаем зависимости тока через диод  $I_0(U)$  от частоты.

Ток проводимости ТГ  $I_{ТГ}(U)$  может быть записан и в виде следующей аппроксимации [5, 6]:

$$I_{ТГ}(U) = I_{\max} \frac{U}{U_{\max}} \exp\left(1 - \frac{U}{U_{\max}}\right) + I_{\min} \exp(A(U - U_{\min})) + I_s \exp\left(b \frac{eU}{kT} - 1\right), \quad (4)$$

где  $I_{\max}$  — максимальный туннельный ток через диод при напряжении  $U_{\max}$ ;  $I_{\min}$  — минимальный ток через диод при напряжении  $U_{\min}$ ;  $A$  — постоянная, характерная для конкретного полупроводникового материала;  $b$  — показатель роста диффузионного тока через переход;  $I_s$  — ток насыщения туннельного перехода без учета туннелирования.

Эффективность генерации (КПД) определяется по зависимостям  $I_0(U(t))$  в режиме генерации в одноконтурном резонаторе. На диоде действует напряжение  $U(t) = U_0 + U_1 \sin(\omega t)$  при  $U_0 > U_{\max}$  при условии  $U_0 - U_1 > 0$ . Рабочая точка в течение периода колебаний перемещается по зависимости  $I_0(U(t))$ . Для определения КПД на первой гармонике необходимо определить постоянную составляющую тока и амплитуду первой гармоники из разложения тока  $I_0(U(t))$  в ряд Фурье. Для получения максимального значения КПД для задаваемого напряжения  $U_0$  амплитуда первой гармоники  $U_1$  оптимизируется (находится такая амплитуда первой гармоники, при которой КПД максимален).

Следует отметить, что в расчетах не учитывается инерционность туннельного механизма проводимости. Это обусловлено тем, что время туннелирования через барьер в 1,45 эВ (GaAs) и шириной 100–150 Å составляет  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  с, что намного меньше периода колебаний рассматриваемых частот ( $10^{-11}$ – $10^{-12}$  с).

2. Если диод выполнен на основе полупроводников с зависимостями  $v(E)$  с ОДП, то сопротивления по-прежнему определяются выражениями (1).

На частотах до 30–50 ГГц для зависимости  $v(E)$  GaAs можно использовать выражение [6]

$$v(U/l) = \frac{\mu_n(U/l) + v_s(U/U_p)^4}{1 + (U/U_p)^4}, \quad (5)$$

где  $v_s$  — дрейфовая скорость насыщения в GaAs ( $\sim 10^7$  см/с);  $U_p$  — пороговое напряжение.

На частотах, где сказывается инерционность перераспределения электронов между долинами зоны проводимости GaAs, необходимо использовать динамические зависимости  $v(E)$  GaAs. С увеличением частоты зависимости  $v(E)$  GaAs начнут отличаться от статических зависимостей и будут представлять гистерезисные кривые [8].

Таким образом, в рассматриваемом случае при определении зависимости КПД диода с ТГ от частоты необходимо учитывать и туннелирование через ТГ, и МПЭ в области А-К.

Рассмотрение проведено в режиме однородного поля в области А-К. В режиме однородного поля использовались частотные зависимости  $v(E)$ , рассчитанные многочастичным методом Монте-Карло [7] для GaAs. При расчетах применялась следующая модель GaAs. Электроны при разогреве электрическим полем переносились из Г-долины, расположенной в центре зоны Бриллюэна, в боковые долины L и X, расположенные выше по энергии над Г-долиной. Учитывались все переносы электронов между долинами. Принимались в расчет все существенные механизмы рассеяния электронов: акустическое, полярное оптическое, примесное, пьезоэлектрическое, междолинное и эквивалентное междолинное. Во всех долинах учитывалась непараболичность. Все параметры, необходимые в расчетах для GaAs, были взяты из работы [8].

**Результаты численных расчетов.** Проводились расчеты для случая GaAs, когда неустойчивости за счет МПЭ нет, и для случая, когда неустойчивость возникает. В первом случае сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  определяются зависимостями (1) с учетом (5), во втором — использовались динамические зависимости  $v(E)$ , рассчитанные методом Монте-Карло.

Численные расчеты ВАХ диодов с ТГ при прямом смещении проводились при следующих параметрах.

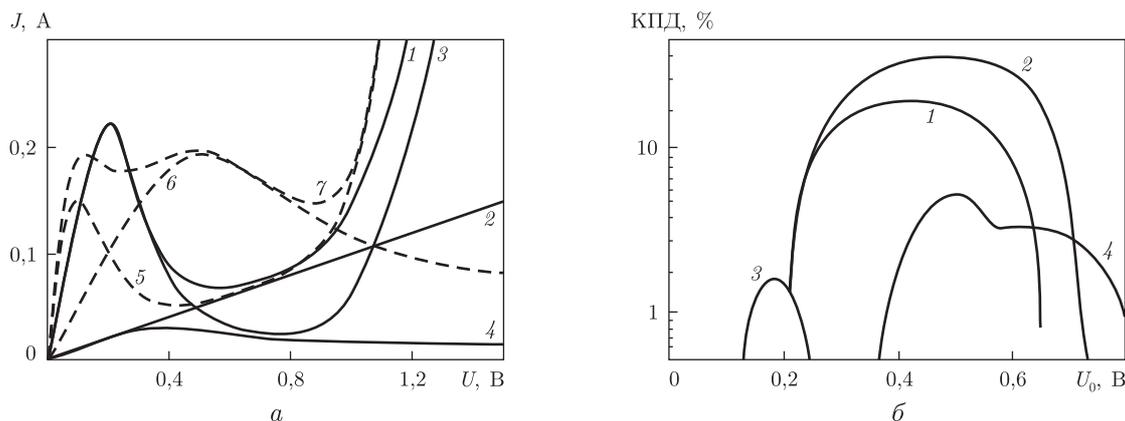


Рис. 2. Ток через диод с ТГ (а) и эффективность генерации (КПД) от приложенного напряжения (б): а — 1 — ток через диод при  $R_1 = \text{const}$ ; 2 — ток через  $R_1 = \text{const}$ ; 3 — ток через диод при  $R_1 = f(U)$ ; 4 — ток через  $R_1 = f(U)$ ; 5 — ток через туннельную границу; 6 — ток через промежуток А-К; 7 — суммарный ток через туннельную границу и параллельно включенный А-К; б — 1 — КПД при  $R_1 = \text{const}$ ; 2 — КПД при  $R_1 = f(U)$ ; 3 — КПД для первой зоны генерации для случая примерного равенства токов ТГ и тока А-К; 4 — КПД для второй зоны генерации для случая примерного равенства токов ТГ и тока А-К

А. Первый вариант: материал GaAs,  $n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_n = 7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , площадь анодного контакта  $S_1 = 10^{-6} \text{ см}^2$ ,  $l_1$  — расстояние между А-К, при  $l_1 = 10^{-4} \text{ см}$ , сопротивление до порогового поля  $R_1 \approx 10 \text{ Ом}$ ,  $I_{\text{max}} = 0,2 \text{ А}$ ,  $U_{\text{max}} = 0,1 \text{ В}$ ,  $I_s = 10^{-6} \text{ А}$ ,  $b = 0,3$ . Сопротивление  $R_2$  при  $l_2 = 10^{-5} \text{ см}$  и  $S_2 = 10^{-6} \text{ см}^2$  менее 1 Ома. Емкость  $C < 1 \text{ пФ}$  ( $C = \epsilon\epsilon_0 S_1/L$ , где  $L$  — толщина ТГ менее  $10^{-6} \text{ см}$ ). Рассеиваемая мощность для указанных выше параметров — 20–200 мВт и полезная мощность — 5–50 мВт.

Б. Второй вариант: материал GaAs тот же, что и в первом варианте, но другие площади и толщины:  $S_1 \approx 10^{-7} \text{ см}^2$ ,  $l_1 = 10^{-5} \text{ см}$ ,  $l_2 = 10^{-6} \text{ см}$  и  $S_2 = 10^{-7} \text{ см}^2$ ,  $I_{\text{max}} = 0,02 \text{ А}$ ,  $U_{\text{max}} = 0,1 \text{ В}$ ,  $I_s = 10^{-7} \text{ А}$ ,  $b = 0,3$ . Емкость  $C < 0,1 \text{ пФ}$ . Рассеиваемая мощность — 2–20 мВт, полезная — 0,2–6 мВт.

1. Если неустойчивости в GaAs нет, то ток через сопротивление А-К вначале растет, а затем уменьшается, что приводит к увеличению сопротивления А-К (рис. 2) и улучшению энергетических характеристик диода с ТГ.

При указанных выше параметрах диода с ТГ максимальная частота генерации составляет порядка 120 ГГц (вариант А). При уменьшении площади диода и ТГ до  $S_1$  и  $S_2$  до  $10^{-7} \text{ см}^2$  уменьшается емкость ТГ ( $C < 0,1 \text{ пФ}$ ) и увеличивается частота, на которой ВАХ не имеет участка ОДП и КПД стремится к нулю (вариант Б). Эта частота составляет приблизительно 1000 ГГц.

Если ток через сопротивление  $R_1(U)$  сравним с током через ТГ, то может возникнуть ситуация, когда суммирование токов через ТГ и через промежуток А-К приведет к двум участкам ОДП на ВАХ диода и двум зонам генерации. Такой случай показан на рис. 2. Два участка ОДП на ВАХ и две зоны генерации получаются при различных значениях:  $U_p$  — для МПЭ и  $U_{\text{max}}$  — для туннелирования. Первая зона генерации обусловлена туннелированием, а вторая — МПЭ и туннелированием.

2. Если неустойчивость возникает, то переменный ток через диод с ТГ является суммой токов через ТГ и канал А-К. Суммарный ток через диод с ТГ представляет собой кривые, определяемые гистерезисными зависимостями  $I(E(t)) = env(E(t))$  за счет МПЭ и тока

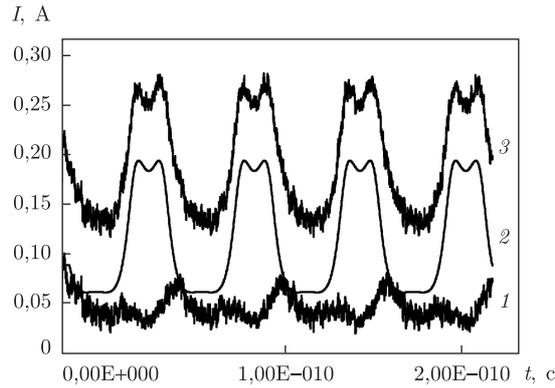


Рис. 3. Токи через диод с ТГ: 1 — ток, обусловленный междолинным переносом электронов в промежутке А-К, рассчитанный методом Монте-Карло; 2 — туннельный ток; 3 — суммарный ток

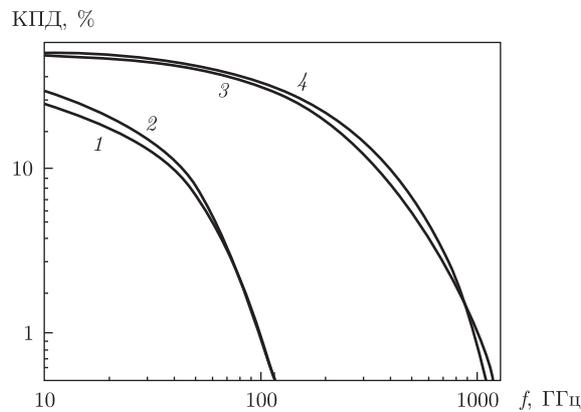


Рис. 4. Зависимость эффективности генерации диода с ТГ с учетом междолинного переноса электронов для концентраций в области А-К  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (2 и 4) и  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (1 и 3) (1, 2 — первый вариант параметров, 3, 4 — второй вариант параметров). На низких частотах менее 1 ГГц эффективности генерации одинаковы для обоих вариантов параметров

через ТГ в течение периода колебаний. При увеличении частоты возрастает сдвиг по фазе между напряжением на диоде с ТГ и суммарным током через диод (рис. 3).

Если ток за счет МПЭ меньше тока ТГ, то частотные свойства диода определяются ТГ. Если токи за счет МПЭ и ТГ сравнимы, то частотные свойства будут определяться обоими механизмами (МПЭ и туннелированием). Частотные зависимости показаны на рис. 4.

При увеличении концентрации в области А-К уменьшается  $R_1$ , что приводит к уменьшению ОДП ТГ и, следовательно, к уменьшению КПД. Если концентрацию еще увеличить, то, главным образом, будет работать диод с МПЭ, эффективность генерации будет низкой.

На более высоких частотах (свыше 150 ГГц) основную роль играет туннелирование через ТГ (см. рис. 4). Неустойчивости за счет МПЭ уже нет, а нелинейность ВАХ А-К остается. Это улучшает КПД диода с ТГ.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

МПЭ в промежутке А-К диода с ТГ при соизмеримых величинах токов диода с МПЭ и ТГ может привести к двум зонам генерации по напряжению.

Увеличение динамического сопротивления  $R_1 = f(U)$  за счет МПЭ на частотах до 150 ГГц приводит к улучшению энергетических характеристик диода с ТГ. Для улучше-

ния КПД на частотах до 150 ГГц необходимо, чтобы доля тока за счет МПЭ была меньше тока ТГ.

На более высоких частотах (свыше 150 ГГц) основную роль играет туннелирование через ТГ. Неустойчивости за счет МПЭ уже нет, а нелинейность А-К есть, это улучшает КПД диода с ТГ.

1. Прохоров Э. Д., Боцула О. В. Отрицательная дифференциальная проводимость полупроводникового диода с туннельными боковыми гранями // Радиофизика и электроника. – 2010. – **15**, № 2. – С. 109–113.
2. Прохоров Э. Д., Боцула О. В., Клименко О. А. Импедансные характеристики диодов с туннельными и резонансно-туннельными границами // Радиофизика и электроника. – 2011. – **16**, № 1. – С. 54–57.
3. Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium *p-n* junction // Phys. Rev. – 1958. – **109**. – P. 603–605.
4. Hall R. N. Tunnel diodes // IRE Trans. Electron Devices. – 1960. – ED – **7**. – P. 1–9.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2. – Москва: Мир, 1984. – 456 с.
6. Прохоров Э. Д. Твердотельная электроника. – Харьков: Изд-во Харьк. нац. ун-та им. В. Н. Каразина, 2008. – 544 с.
7. Иващенко В. М., Митин В. В. Моделирование кинетических явлений в полупроводниках. Метод Монте-Карло. – Киев: Наук. думка, 1990. – 192 с.
8. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, URL, <http://www.ioffe.rssi.ru>, Semiconductor, GaAs.

Харьковский национальный университет  
им. В. Н. Каразина

Поступило в редакцию 11.10.2011

**Е. Д. Прохоров, О. В. Боцула, О. О. Клименко**

### **Вплив міждолинного перенесення електронів на ефективність генерації діодів з тунельними межами на основі GaAs**

*Досліджено вольт-амперні характеристики та ефективність генерації діодів з тунельними межами в структурах типу “сендвіч” на основі GaAs. Показано, як впливає міждолинне перенесення електронів в областях, прилеглих до тунельної межі, на ефективність генерації діодів у діапазоні частот.*

**E. D. Prokhorov, O. V. Botsula, O. A. Klymenko**

### **Effect of intervalley electron transfer on the efficiency of the generation in diodes with tunnel boundaries based on GaAs**

*The current-voltage characteristics and the effectiveness of the generation in diodes with tunnel boundaries in structures of the sandwich type on the basis of GaAs are studied. The effect of the intervalley electron transfer in the areas adjacent to the tunnel border on the generation efficiency for diodes in a certain frequency range is described.*