

06.2
©1995

ОЦЕНКА ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДВУХБАРЬЕРНЫХ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

И. В. Беляева, А. Б. Пашковский

С тех пор как двухбарьерные резонансно-туннельные структуры (ДБРТС) были предложены [1] и экспериментально реализованы [2], они продолжают привлекать пристальное внимание экспериментаторов и теоретиков. Статические характеристики таких структур изучены достаточно подробно [3,4]. Однако в последние годы с развитием современной наноэлектронной технологии на основе ДБРТС появились новые приборы — диоды и транзисторы с резонансным туннелированием электронов, работающие в терагерцовом диапазоне частот. Одной из основных характеристик таких приборов является отрицательная динамическая (высокочастотная) проводимость (ОДП). Несмотря на ряд работ [5–8], посвященных анализу динамики резонансного туннелирования электронов, зависимость ОДП от параметров ДБРТС не изучалась. Величина динамической проводимости обычно оценивалась по величине статической дифференциальной проводимости, а граница существования ОДП связывалась с характерным временем нахождения электронов внутри структуры на резонансном квазиуровне $\omega_k \approx \Gamma/\hbar$ [9–11] (здесь Γ — полуширина резонансного уровня). В то же время результаты работы [12] заставляют усомниться в применимости подобных оценок в терагерцовом диапазоне частот.

Рассмотрим этот вопрос на простейшем примере двухбарьерной резонансно-туннельной структуры (GaAs-AlGaAs) с тонкими (δ -образными) барьерами [13], к которой приложено слабое переменное однородное электрическое поле (см. вставку к рис. 2). Постоянное поле отсутствует. Электроны падают на ДБРТС из гетероинжектора, в котором они имеют распределение Ферми. Вообще говоря, функция распределения электронов, вылетевших из гетероинжектора и падающих на ДБРТС, зависит от многих факторов, например от формы дна зоны проводимости в районе инжектора и коэффициента отражения от ДБРТС. Поэтому для дальнейших оценок рассмотрим простейшую классическую мо-

дель инжектора без учета квантового отражения электронов от границы, в которой концентрация электронов, падающих на ДБРТС, определяется из уравнения непрерывности. Высота инжектора подбирается так, чтобы на данной частоте величина ОДП была максимальна (обычно высота инжектора близка к высоте резонансного уровня ДБРТС). Пространственным зарядом пренебрегается. Естественно, определение проводимости в отсутствие постоянного электрического поля носит в определенной мере гипотетический характер, однако расчеты показывают, что величины ОДП в структурах без поля и в структурах со слабым тянущим полем (падение потенциала на структуре много меньше высоты резонансного уровня) близки, так что приведенные ниже результаты могут служить верхней оценкой величины ОДП в ДБРТС. Расчеты проводились по модели [13], малосигнальная активная проводимость структуры G в соответствии с [14] определялась как отношение удвоенной удельной мощности, отбираемой электронам от высокочастотного поля к квадрату напряжения, приложенного к структуре.

На рис. 1 приведены зависимости от ширины ДБРТС величины отрицательной активной проводимости $|G| = -G$ на

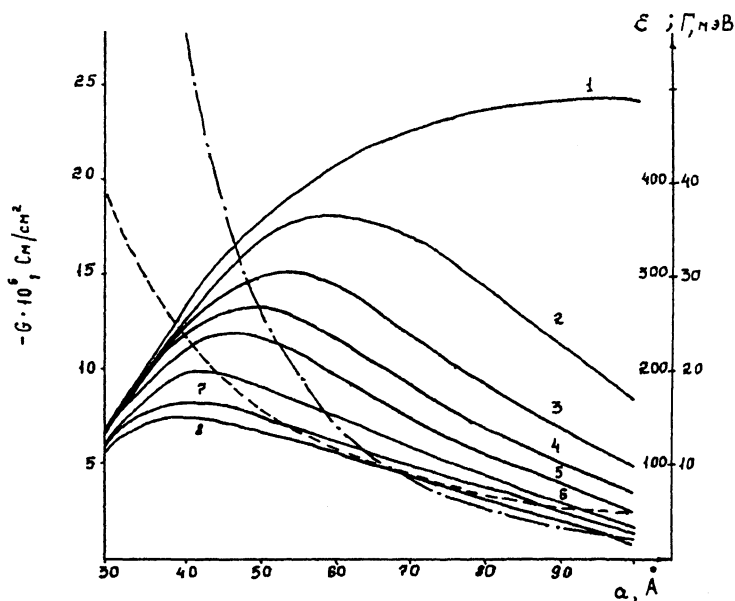


Рис. 1. Зависимость величины отрицательной активной проводимости $|G|$ (сплошные линии), высоты первого резонансного уровня ϵ (пунктирная линия) и его полуширины Γ (штрихпунктирная линия) от расстояния между барьерами. 1 — $\nu = 0$, 2 — $\nu = 1$, 3 — $\nu = 2$, 4 — $\nu = 3$, 5 — $\nu = 4$, 6 — $\nu = 6$, 7 — $\nu = 8$, 8 — $\nu = 10$ ТГц.

различных частотах, высоты резонансного уровня ε и его полуширины Γ . Так как потенциальные барьеры толщиной $b = 11 \text{ \AA}$ и высотой $\varphi_B = 1.04 \text{ эВ}$ считаются δ -образными, то ширина структуры определяется как расстояние между барьерами. Температура электронов в инжекторе предполагается равной $T = 300 \text{ К}$, концентрация $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Видно, что на каждой частоте зависимость $|G(a)|$ имеет четкий максимум, в котором $|G(a)| = G_{\max}$. Поэтому если на данной частоте $|G| \neq G_{\max}$, то ДБРТС с разными значениями полуширины резонансного уровня и статической проводимости $G(0)$ могут иметь одну и ту же величину ОДП. Кроме того, структуры с низкой величиной $G(0)$ могут иметь заметно большие величины ОДП, чем структуры, в которых статическая проводимость велика. С ростом частоты ширина структуры a_{opt} , соответствующая G_{\max} , заметно уменьшается. Зависимости a_{opt} и G_{\max} от частоты для ДБРТС с различными высотами барьеров приведены на рис. 2. Видно, что на низких частотах величины a_{opt} и G_{\max} заметно изменяются. Так, при увеличении частоты от 0 до 1 ТГц a_{opt} и G_{\max} уменьшаются более чем в 1.5 и 1.3 ра-

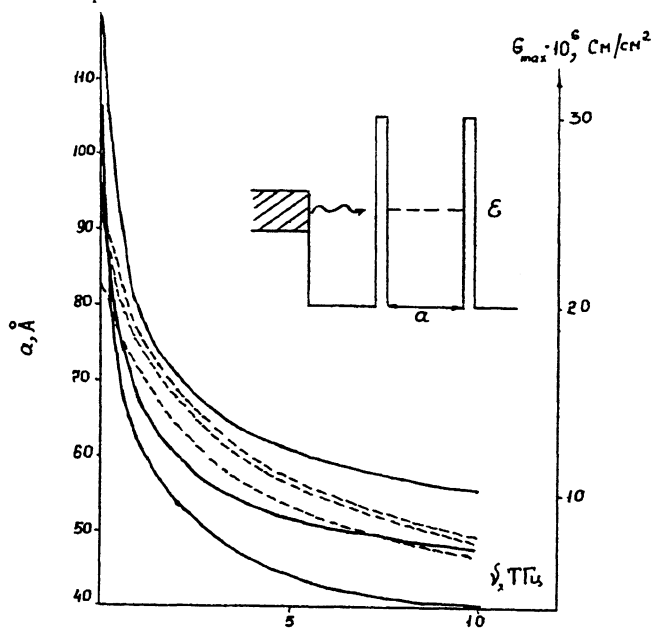


Рис. 2. Зависимость оптимального расстояния между барьерами a_{opt} (сплошная линия) и максимальной величины ОДП G_{\max} (пунктирная линия) от частоты. Высота барьеров: 1 — $\varphi_B = 0.5$, 2 — $\varphi_B = 0.75$, 3 — $\varphi_B = 1.04 \text{ эВ}$, толщина $b = 11 \text{ \AA}$.

На вставке схематически изображена зонная диаграмма рассматриваемой структуры.

за соответственно. С дальнейшим ростом частоты зависимости $a_{\text{opt}}(\nu)$ и $G_{\text{max}}(\nu)$ становятся заметно более плавными. Видно также, что с уменьшением высоты барьера величина a_{opt} заметно увеличивается, причем тем сильнее, чем меньше φ_B . При этом величина G_{max} слабо зависит от φ_B . Так, при $\varphi_B > 0.75$ эВ зависимости $G_{\text{max}}(\nu)$ практически совпадают. Последний результат может иметь существенное практическое значение. Дело в том, что в расчетах предполагается параболический закон дисперсии и баллистическое прохождение электронов через зону взаимодействия, а при больших высотах инжектора энергия электронов в GaAs может достигать величин, при которых проявляется непараболический закон дисперсии и начинаются междолинные переходы. Эти эффекты могут существенно изменить наблюдаемую выше картину, и на частотах $\nu > 1$ ТГц, по всей видимости, — в сторону уменьшения, а возможно, и исчезновения ОДП. Однако тот факт, что при уменьшении высоты барьеров максимальная величина ОДП изменяется слабо, в то время как соответствующие величины ширины структуры и соответственно высоты резонансного уровня меняются заметно, позволяет для каждой частоты подбирать параметры структуры, при которых величина ОДП будет близка к максимальной, а непараболическость и междолинное рассеяние при прохождении электронов через область взаимодействия с высокочастотным полем несущественны.

Из приведенных результатов можно также сделать вывод, что не существует четкой связи между величиной отрицательной высокочастотной проводимости и такими статическими характеристиками ДБРТС, как величина статической проводимости $G(0)$, полуширина резонансного уровня Γ .

Авторы благодарны А.С. Тагеру за внимание к работе.

Данная работа поддерживается Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 94-02-04449.

Список литературы

- [1] Tzu R., Ezaki L. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. P. 562.
- [2] Solner T.C.L.G., Goodhue W.D., Tannenwald R.E., Parker C.D., Peck D.D. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. P. 588.
- [3] Долманов И.И., Рыжий В.И., Толстизин В.И. // ФТП. 1991. Т. 24. В. 9. С. 1574–1583.
- [4] Collins S., Lowe D., Barker J.R. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1987. V. 20. P. 6213–6232.
- [5] Волкова Е.А., Попов Ф.М., Поповичева О.Б. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 9. С. 1618–1623.
- [6] Frensley W.R. // Superlattices and Microstructures. 1988. V. 4. N 4/5. P. 497–501.
- [7] Chen L.Y., Ting C.S. // Physical Review B. 1991–11. V. 43. N 3. P. 2097–2105.

- [8] *Kislov V., Kamenev A.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. N 12. P. 1500-1502.
- [9] *Ricco B., Azbel M.Ya.* // Phys. Rev. B. 1984. V. 29. P. 1970-1981.
- [10] *Lury S.* // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 5. P. 490-492.
- [11] *Brown E.R., Parker C.D., Solner T.C.L.G.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 10. P. 934-936.
- [12] *Golant E.I., Martinov Ya.B., Paskovskii A.B., Tager A.S.* // Abstr. Nanostruct. Phys. and Technol. Intern. Symp. St. Petersburg, Russia, 1994. P. 276-279.
- [13] *Пашковский А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 7-11.
- [14] *Пашковский А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 1-6.

Научно-исследовательский
институт "ИСТОК"
Фрязино

Поступило в Редакцию
22 июля 1994 г.

