

06;09

Резонансно-туннельно-пролетный диод с когерентным туннелированием как источник колебаний субмиллиметрового диапазона

© Э.А. Гельвич, Е.И. Голант, А.Б. Пашковский, В.П. Сазонов

Государственное научно-производственное предприятие "Исток",
Фрязино

Поступило в Редакцию 11 января 1999 г.

Проведен усовершенствованный метод расчета резонансно-туннельно-пролетного диода, который позволил продемонстрировать возможность существенного увеличения его отрицательного динамического сопротивления.

Предпринятые за последние годы большие усилия, позволившие создать эффективные генераторы электромагнитных колебаний на основе надежных полупроводниковых приборов: диодов Ганна и лавинно-пролетных диодов в миллиметровом диапазоне, квантовых каскадных лазеров в дальнем ИК диапазоне, — практически не затронули субмиллиметровый диапазон. В то же время потребность в таких источниках колебаний существует и постоянно растет. В частности, спектральные линии поглощения молекул многих веществ, применяемых в промышленности и научных исследованиях, лежат именно в субмиллиметровом диапазоне.

При этом существует полупроводниковый прибор, который достаточно давно претендует на роль активного полупроводникового элемента субмиллиметрового диапазона: резонансно-туннельно-пролетный диод (РТПД), разновидность инжекционно-пролетного диода с инжекцией электронов через двухбарьерную квантово-размерную гетероструктуру с резонансным туннелированием (ДБРТС). Экспериментально было показано, что активный участок таких диодов обладает отрицательной динамической проводимостью вплоть до частот порядка 2.5 THz [1], а на частоте 712 GHz была получена генерация [2]. Однако достигнутые уровни мощности оказались малы для практического применения, и дальнейшего развития эти экспериментальные работы не получили.

Следует отметить, что схемы диодных генераторов можно условно разделить на две группы: параллельную, когда электромагнитная волна распространяется параллельно гетерограницам полупроводниковой структуры, как в лазерах на основе резонаторов Фабри–Перо с эмиссией света через боковые грани кристалла, и последовательную, как в генераторах на ЛПД и диодах Ганна и в лазерах с поверхностной эмиссией света типа VCSEL [3], когда электромагнитная волна выходит из активного участка перпендикулярно его гетерограницам. Последовательная схема имеет ряд существенных преимуществ перед параллельной, однако ее недостатком является неизбежное присутствие пассивных омических участков на пути электромагнитной волны, обуславливающее весьма жесткое условие генерации: отрицательное сопротивление активного участка должно быть больше по модулю суммарного сопротивления пассивных слоев, которое при площади поперечного сечения 10^{-6} см^2 имеет порядок единиц Ома [4]. Таким образом, для последовательной схемы генератора ключевым требованием к области взаимодействия является наличие отрицательного сопротивления (единичной площади), большего $10^{-6} (\Omega \cdot \text{см}^2)$.

В [4] было обращено внимание на возможность использования резонансного характера частотной зависимости активного отрицательного динамического сопротивления (ОДС) пролетного участка любого инжекционно-пролетного диода с запаздывающей инжекцией для существенного повышения ОДС РТПД. Резонансный характер этой зависимости проявляется, когда реактивная (индуктивная — вследствие запаздывания инжекции) проводимость электронного потока приближается к емкостной проводимости пролетного участка. Ясно, что частота, соответствующая этому резонансу, определяется отношением амплитуд тока и поля на выходе ДБРТС и углом запаздывания тока относительно поля и является аналогом лавинной (характеристической) частоты ЛПД. На основании опубликованных данных предельная частота генерации РТПД с приемлемым для практики уровнем мощности в [4] была оценена как 300–400 GHz.

В дальнейшем была предложена усовершенствованная схема РТПД, предполагающая использование дополнительного инжектора горячих электронов для введения электронов с необходимой продольной энергией на один из уровней размерного квантования двухбарьерной структуры, с прозрачностью барьеров, достаточной для когерентного транспорта электронов через структуру. Теоретически была показана перспективность использования такой схемы для создания лазеров с резонатором

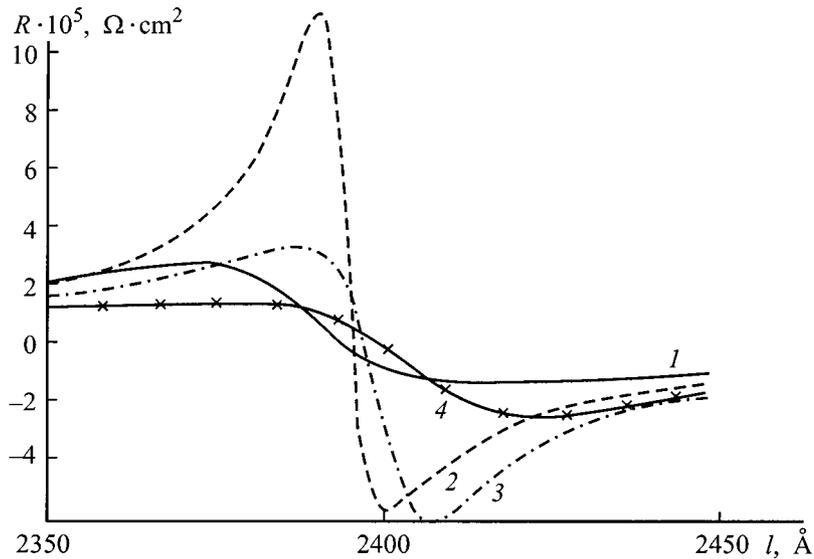


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления РТПД от длины пролетного участка при $T = 77$ К. Относительная высота инжектора $E_g/E_0 = 0.83$ (1), $E_g/E_0 = 0.84$ (2), $E_g/E_0 = 0.85$ (3), $E_g/E_0 = 0.83$ (4).

Фабри–Перо в дальнем ИК диапазоне [5] и генераторов на РТПД в субмиллиметровом диапазоне длин волн [6]. Однако рассчитанные в [6] величины ОДС РТПД для частоты 2 THz были все еще малы для получения практически значимой выходной мощности. Следует отметить, что, несмотря на строгий квантово-механический расчет проводимости РТПД в [6], активное сопротивление диода рассчитывалось все же приближенно, в предположении малости электронной составляющей реактивной проводимости по сравнению с емкостной проводимостью диода. Это приближение не учитывало описанный в [4] эффект увеличения ОДС РТПД вблизи его характеристической частоты, когда полная реактивная проводимость диода близка к нулю. В настоящей работе использован усовершенствованный метод расчета, свободный от этого недостатка, позволивший продемонстрировать возможность существенного увеличения ОДС РТПД в субмиллиметровом диапазоне.

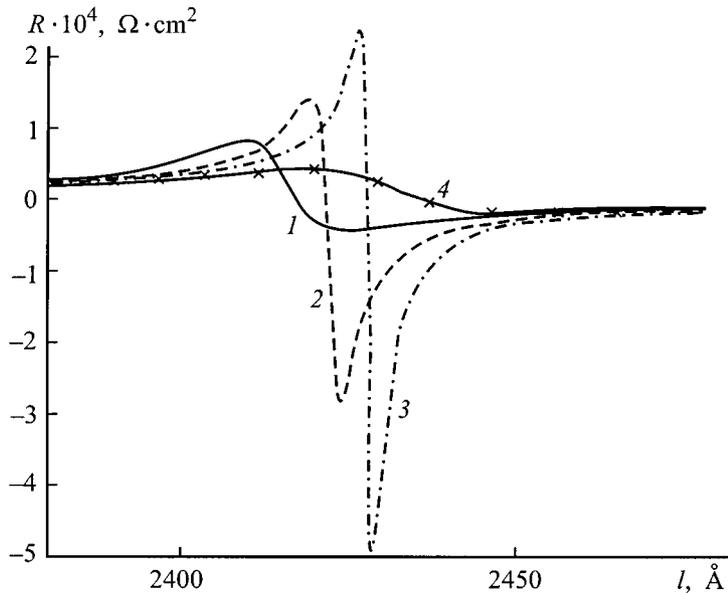


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления РТПД от длины пролетного участка при $T = 300$ К. Относительная высота инжектора $E_g/E_0 = 0.88$ (1), $E_g/E_0 = 0.90$ (2), $E_g/E_0 = 0.92$ (3), $E_g/E_0 = 0.94$ (4).

Расчет был проведен для диодных структур с когерентным транспортом электронов, близких к исследованным в [6]. Предполагается, что электроны падают на ДБРТС из гетероинжектора, в котором они имеют распределение Ферми, концентрацию n и температуру T . Отражением электронов от границ гетероинжектора пренебрегается.

Результаты расчета активного сопротивления РТПД R на частоте $\nu = 3$ THz от длины пролетного участка диода на основе GaAs/AlGaAs ДБРТС с высотами барьеров $\varphi_B = 1.04$ eV, толщиной $b = 11$ Å, расстоянием между барьерами $a = 65$ Å (энергия резонансного уровня $E_0 \approx 100$ meV), при $n = 10^{18}$ cm $^{-3}$ и $T = 77$ К приведены на рис. 1. Различные кривые соответствуют различным отношениям высот гетероинжектора E_g к энергии резонансного уровня E_0 . Видно, что существуют оптимальные значения этого отношения (в данном

случае $E_g/E_0 \approx 0.84-0.85$, обеспечивающие удельное отрицательное динамическое сопротивление РТПД на уровне $6 \cdot 10^{-5}(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ при достаточно коротких пролетных участках $\approx 0.24 \mu\text{m}$, допускающих баллистический транспорт электронов.

В квазиклассическом РТПД характеристическая частота диода резко зависит от параметров структуры, определяющих крутизну и фазу инжекции модулированного по плотности электронного потока в пролетный участок; не менее резкую зависимость дает и полностью квантовый расчет: из рис. 1 видно, что отклонение высоты инжектора на единицы миллиэлектронвольта от оптимального значения во много раз уменьшает ОДС диода. Видно также, что эффект проявляется в очень узкой области длин пролетного участка $\sim 50 \text{ \AA}$. Интересно отметить, что рост температуры кристалла, влияние которой учитывалось через температурную зависимость фермиевского распределения электронов в инжекторе, ведет к увеличению резонансного значения ОДС. Это хорошо видно на рис. 2, где для той же частоты 3 THz и диодной структуры, отличающейся только небольшим изменением относительной высоты инжектора при $T = 300 \text{ K}$ получается отрицательное сопротивление $5 \cdot 10^{-4}(\Omega \cdot \text{cm}^2)$, характерное, скорее, для сантиметрового, чем для субмиллиметрового диапазона.

Таким образом, последовательный квантово-механический расчет взаимодействия электронов, когерентно туннелирующих через активную область РТПД, с высокочастотным электрическим полем подтверждает возможность резонансного увеличения отрицательного динамического сопротивления диода вблизи его характеристической частоты, которая, как показывает расчет, при туннелировании через основной уровень размерного квантования GaAs/AlGaAs ДБРТС может достигать 3 THz ($\lambda = 0.1 \text{ mm}$).

Следует отметить, что наблюдение и использование этого эффекта, вследствие резкой зависимости ОДС предлагаемой (весьма специфической) структуры от параметров, требует очень точного ее изготовления, вполне, впрочем, выполнимого при современном уровне технологии.

Список литературы

- [1] *Sollner T.C.L.G., Goodhue W.D., Tannewald P.E., Parker C.D., Peck D.D.* // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 6. P. 588–590.
- [2] *Brown E.R., Soderstrom J.R., Parker C.D., Mahoney L.J., Molvar K.M., McGill T.C.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 20. P. 2291–2293.
- [3] *Moneger S., Qiang H., Pollak F.H., Mathin D.L., Droopard R., Maracas G.N.* // Solid-State Electronics. 1995. V. 39. N 6. P. 871–874.
- [4] *Голант Е.И., Тагер А.С.* // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1989. В. 8(422). С. 19–24.
- [5] *Голант Е.И., Пашковский А.Б., Тагер А.С.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 21. С. 74–79.
- [6] *Голант Е.И., Пашковский А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 7. С. 16–21.