Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 2, с. 128 – 131 © 2016 г. 25 января

# Влияние ТГц-резонатора на проводимость короткопериодных сверхрешеток GaAs/AlAs

*И. В. Алтухов*[+], *С. Е. Дижур*[+], *М. С. Каган*[+1)], *С. К. Папроцкий*[+], *Н. А. Хвальковский*[+] *А. Д. Буравлев*[*], *А. П. Васильев*[*], *Ю. М. Задиранов*[*], *Н. Д. Ильинская*[*], *А. А. Усикова*[*], *В. М. Устинов*[*]

[+]*Институт радиотехники и электроники им. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия*

[*]*Физико-технический институт им. Иоффе РАН, 194021 С. Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 11 ноября 2015 г.

После переработки 9 декабря 2015 г.

Исследовалась минизонная проводимость в короткопериодных сверхрешетках GaAs/AlAs с ТГц-резонатором. На вольт-амперных характеристиках при некотором пороговом напряжении наблюдалось скачкообразное уменьшение тока, вызванное образованием электрических доменов. Обнаружено, что при изменении параметров резонатора это пороговое напряжение существенно меняется. Предложено объяснение, связывающее сдвиг порога с возбуждением в резонаторе колебаний значительной амплитуды.

DOI: 10.7868/S0370274X16020090

Одной из основных проблем в освоении терагерцового (ТГц) диапазона частот электромагнитного спектра является разработка полупроводниковых источников ТГц-излучения, работающих при комнатной температуре. В объемных полупроводниках с горячими электронами типа диодов Ганна рабочие частоты ограничены временами установления отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) и диэлектрической релаксации. Первое время в большинстве полупроводников обычно находится в области пикосекунд. Максвелловское время релаксации при обычном уровне легирования порядка $10^{15}$ см$^{-3}$ также составляет $\sim 10^{-12}$ с. Поэтому полоса частот работы приборов с горячими электронами не превышает 100–200 ГГц. Это ограничение снимается при использовании лазерной схемы, когда энергия кванта излучения определяется разностью энергий уровней с инверсной заселенностью и не зависит от инерционности установления проводимости. Однако все ТГц полупроводниковые лазеры работают при криогенных температурах. Реализовать инверсию заселенности при комнатной температуре практически невозможно, поскольку $kT \simeq 25$ мэВ, а энергия квантов в ТГц-области $\sim 10$ мэВ. Поэтому разумным представляется поиск систем с высокочастотной ОДП, которая может возбудить колебания в соответствующем резонаторе. Хорошим примером являются резонансно-туннельные диоды, в которых недавно осуществлена генерация до частот $\sim$ 1.4 ТГц [1, 2]. Другой возможной системой являются сверхрешетки (СР).

Исследование электронного транспорта в полупроводниковых СР вызывает большой интерес в течение последних десятилетий [3], в основном в связи с предсказанным усилением блоховских волн и возможностью создания перестраиваемых источников генерации ТГц-диапазона. Основной трудностью в реализации таких источников является образование электрических доменов из-за статической ОДП, возникающей в СР при резонансном туннелировании между квантово-размерными состояниями в соседних квантовых ямах, что препятствует усилению блоховских волн [4]. Поэтому существенным является поиск способов подавления ОДП и электрической неустойчивости. Были предложены различные способы подавления образования электрических доменов, например с использованием ТГц-резонатора или приложенного внешнего СВЧ-поля [5]. Высокочастотное поле может приводить к тому, что зависимость среднего тока от постоянного напряжения будет иметь положительный наклон в рабочей точке и тем самым будет достигнута устойчивость однородного распределения поля. С другой стороны, образцы с доменами могут обладать динамической ОДП на высоких частотах [6–12] (действительная часть импеданса отрицательна) и могут быть использованы для ТГц-генерации.

Ранее мы наблюдали влияние резонатора на туннельный ток в сверхрешетках InAs/AlSb с гетеропереходами II рода [13, 14]. На вольт-амперных харак-

1)e-mail: kagan@cplire.ru

теристиках (ВАХ) в области нерезонансного туннелирования (при напряжениях, при которых перекрытие основных состояний в соседних квантовых ямах и, соответственно, минизонная проводимость отсутствуют) была обнаружена серия максимумов с участками ОДП. Максимумы на ВАХ оказались периодическими по напряжению. Их период коррелировал с резонансной частотой резонатора. Возникновение этих максимумов связывалось с эффектом Пёрселла, который заключается в увеличении интенсивности спонтанного излучения в резонаторе по сравнению с интенсивностью спонтанного излучения в свободное пространство. В настоящем сообщении приведены данные о влиянии ТГц-резонатора на проводимость СР GaAs/AlAs в режиме минизонной проводимости при образовании электрических доменов.

Исследовался вертикальный транспорт в резонаторных структурах на основе короткопериодных СР GaAs/AlAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Сверхрешетки содержали 100 периодов GaAs(4 нм)/AlAs(2 нм), расположенных между сильнолегированными верхним контактным слоем $n^+$-GaAs ($n = 1 \cdot 10^{19}\,\text{см}^{-3}$) и подложкой $n^+$-GaAs ($n = 2 \cdot 10^{18}\,\text{см}^{-3}$). Концентрация доноров в СР составляла $(1{-}2) \cdot 10^{17}\,\text{см}^{-3}$. С помощью сухого (ионного) травления и обычной фотолитографии были изготовлены мезаструктуры в форме дисков диаметром от 10 до 15 мкм. По краю каждого диска наносился металлический токовый контакт в виде кольца, который одновременно формировал распределенный ТГц-резонатор. Фактически, это микрополосковая линия, замкнутая в кольцо, в которой электрическое поле электромагнитной волны направлено поперек слоев, а волна распространяется вдоль периметра кольца. Резонансные частоты соответствуют целому числу длин волн на длине кольца. В нашем случае это длины волн $\sim 30{-}47$ мкм, что отвечает длинам волн в свободном пространстве от $\sim 110$ до $\sim 170$ мкм. Для подвода напряжения использовалась полосковая линия, заканчивавшаяся контактной площадкой. Перед нанесением металла (золота) пластинка с вытравленными мезами покрывалась диэлектриком (нитрид кремния). Фотография и схема структуры приведены на рис. 1.

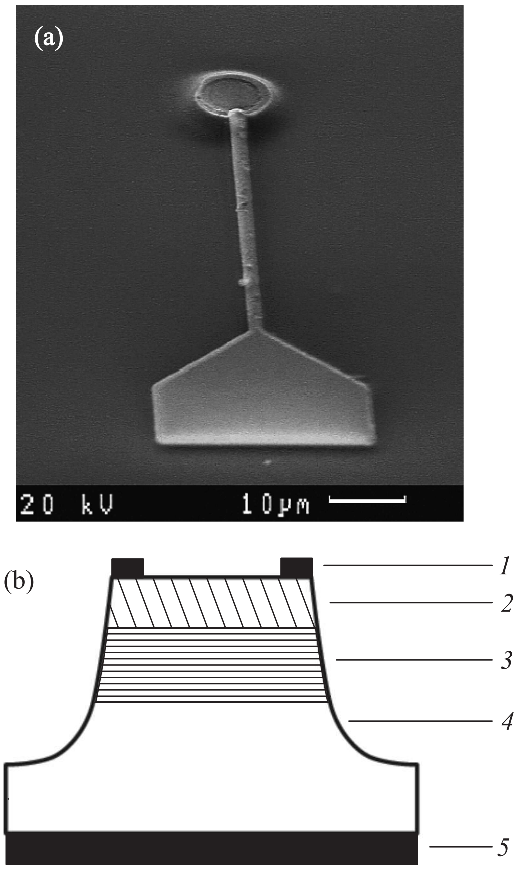


Рис. 1. (a) – Резонаторный образец с токоподводом. (b) – Схема структуры в разрезе: *1*, *5* – верхний кольцевой и нижний металлические контакты, *2* – верхний контактный $n^+$-слой, *3* – сверхрешетка, *4* – сильнолегированная подложка

К образцу прикладывались импульсы напряжения треугольной формы. Времена нарастания импульсов напряжения составляли 0.2–10 мкс. На рис. 2 приведены ВАХ структуры GaAs/AlAs при комнатной и азотной температурах. При некотором пороговом напряжении наблюдается скачок тока, вызванный образованием движущихся электрических доменов. Сдвиг порога к меньшим напряжениям при охлаждении связан с ослаблением фононного рассеяния. Низкочастотные ($\sim 100$ МГц) колебания тока, которые могли возникать при напряжениях выше порогового, вызваны возбуждением паразитных контуров в цепи питания. При этих же напряжениях могли наблюдаться немонотонные особенности (см. рис. 3). В отличие от эквидистантных максимумов, наблюдавшихся в режиме нерезонансного туннелирования в СР InAs/AlSb [13, 14], эти особенности нерегулярны и отличаются в разных образцах. Если эти особенности связаны с влиянием резонатора, они могут возникать из-за изменения параметров домена с ростом напряжения. В свою очередь, резонатор может влиять на форму ВАХ, если в нем возбуждаются колебания.

Для проверки данного предположения был поставлен следующий опыт. На резонаторный образец наносилась капля серебряной эпоксидной проводящей пасты, которая перекрывала всю верхнюю часть

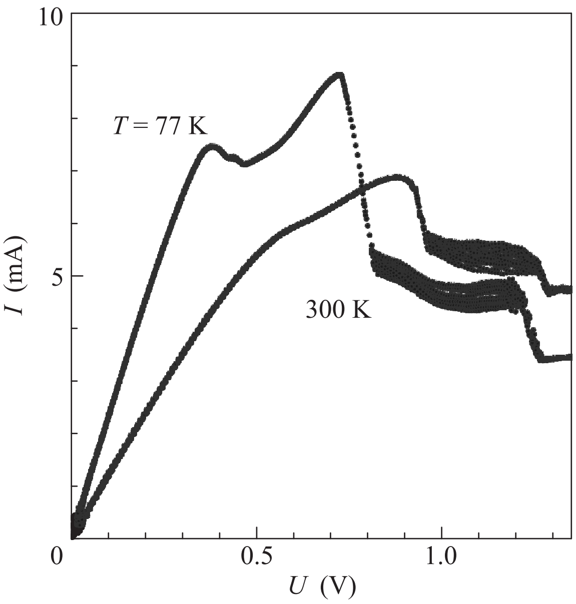


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика сверхрешетки GaAs/AlAs при $T = 77$ и 300 K в режиме заданного напряжения

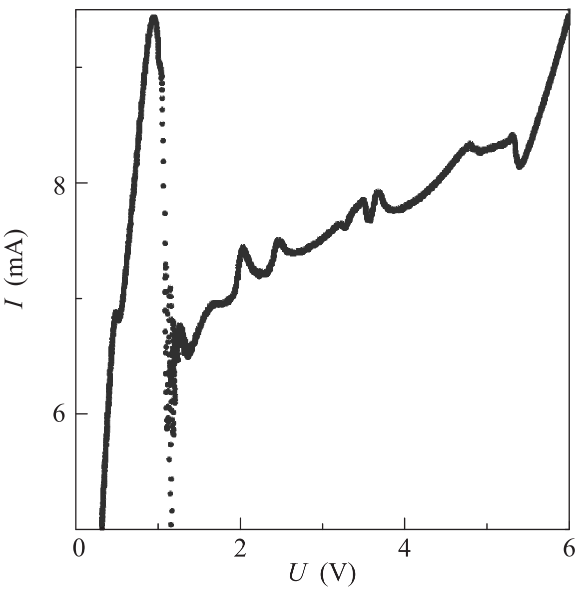


Рис. 3. Особенности вольт-амперной характеристики сверхрешетки GaAs/AlAs при $T = 300$ K

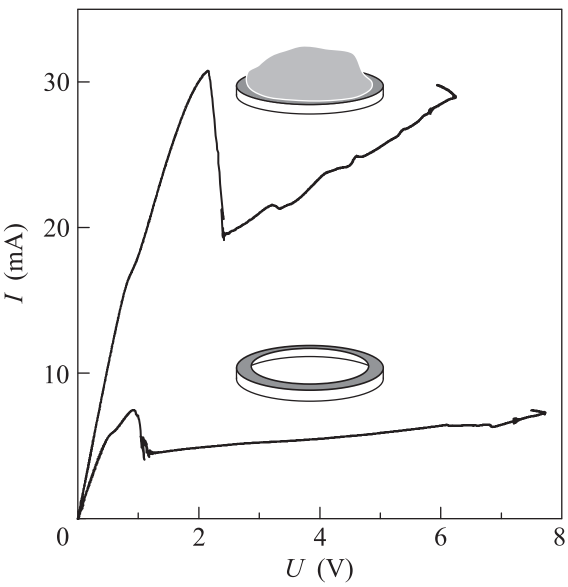


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики сверхрешетки GaAs/AlAs при изменении резонатора. Нижняя кривая – до нанесения капли, верхняя – после нанесения; $T = 300$ K

мезаструктуры (см. вставки к рис. 4). На рис. 4 показаны ВАХ структуры до и после нанесения этой капли. Ток через измененный таким способом образец увеличивался, что естественно, поскольку увеличилась площадь контакта. Действительно, увеличение тока примерно соответствует увеличению площади. Кроме того, изменилось пороговое поле образования домена, чего, вообще говоря, быть не должно, так как толщина структуры (расстояние между токовыми контактами) осталась неизменной. Возможная причина изменения порогового поля при изменении площади контакта – возникновение в резонаторе переменного поля достаточно большой амплитуды. Действительно, если к образцу с нелинейной ВАХ приложено, кроме постоянного, еще и переменное напряжение соизмеримой амплитуды, то за счет детектирования возникает дополнительное постоянное напряжение, сдвигающее рабочую точку. Таким образом, данный опыт свидетельствует о возбуждении ТГц-колебаний в резонаторе за счет отрицательного сопротивления сверхрешетки с доменами. Отметим, что аналогичный эффект – влияние переменного электрического поля на форму ВАХ по постоянному току – наблюдался в объемном GaAs с эффектом Ганна [15].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 14-02-01062).

1. M. Feiginov, H. Kanaya, S. Suzuki, and M. Asada, Appl. Phys. Lett. **104**, 243509 (2014).
2. H. Kanaya, R. Sogabe, T. Maekawa, S. Suzuki, and M. Asada, J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves **35**, 425 (2014).
3. A. Wacker, Phys. Rep. **357**, 1 (2002).
4. F. Klappenberger, K. N. Alekseev, K. F. Renk, R. Scheuerer, E. Schomburg, S. J. Allen, G. R. Ramian,

J. S. S. Scott, A. Kovsh, V. Ustinov, and A. Zhukov, Eur. Phys. J. B **39**, 483 (2004).
5. K. N. Alekseev, M. V. Gorkunov, N. V. Demarina, T. Hyart, N. V. Alexeeva, and A. V. Shorokhov, Europhys. Lett. **73**, 934 (2006).
6. H. W. Thim, IEEE Trans. **ED-14**, 517 (1967).
7. B. W. Hakki, J. Appl. Phys. **38**, 808 (1967).
8. Н. Г. Жданова, М. С. Каган, С. Г. Калашников, ФТП **8**, 1731 (1974).
9. И. В. Алтухов, Н. А. Васильев, М. С. Каган, С. Г. Калашников, В. В. Кукушкин, В. С. Лукаш, ФТП **13**, 1971 (1979).
10. И. В. Алтухов, М. С. Каган, С. Г. Калашников, В. В. Кукушкин, В. Н. Соляков, ФТП **13**, 2316 (1979).
11. И. В. Алтухов, М. С. Каган, С. Г. Калашников, В. В. Кукушкин, С. М. Овечкин, Письма в ЖТФ **6**, 548 (1980).
12. М. С. Каган, Е. Г. Ландсберг, И. В. Чернышов, ФТП **18**, 986 (1984).
13. М. С. Каган, И. В. Алтухов, А. Н. Баранов, Н. Д. Ильинская, С. К. Папроцкий, Р. Тесье, А. А. Усикова, ФТП **47**, 1489 (2013).
14. M. S. Kagan, I. V. Altukhov, S. K. Paprotskiy, A. N. Baranov, R. Teissier, N. D. Il'inskaya, A. A. Usikova, A. D. Buravlev, and V. M. Ustinov, Lithuanian J. Phys. **54**, 50 (2014).
15. И. В. Алтухов, М. С. Каган, С. Г. Калашников, В. В. Кукушкин, Е. Г. Ландсберг, ФТП **12**, 299 (1978).