

малые пороговые плотности токов 175 (ширина квантовой ямы GaAs 50 Å), 43 (100 Å), 50 А/см² (200 Å) для длин резонаторов 2000—3000 мкм (рис. 2, в, 1). Методика выращивания лазеров описана в [4]. Согласно [1], для длины волны генерации ~1.0 мкм минимальная пороговая плотность тока составила 152 А/см² (рис. 2, в, 2). Толщина In_{0.37}Ga_{0.63}As квантовой ямы 40 Å. Вместе с тем для длины волны генерации 1.03 мкм пороговая плотность тока составила уже 300—600 А/см² [2] (рис. 2, в, 3). Таким образом, увеличение пороговой плотности тока до 900 А/см² (рис. 2, в, 4) для длины волны генерации 1.1 мкм не является неожиданным.

Дальнейшая работа необходима для снижения пороговой плотности тока ДГС РО лазеров с напряженными слоями (In, Ga)As на длины волн генерации $\lambda > 1.1$ мкм.

Список литературы

- [1] Fekete D., Chan K. T., Ballantyne J. M., Eastman L. F. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 49. N 24. P. 1659—1660.
- [2] Baillargeon J. N., York P. K., Zmudzinski C. A., Fernandez G. E., Beernink K. J., Coleman J. J. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 6. P. 457—459.
- [3] Копьев П. С., Леденцов Н. Н. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 10. С. 1729—1742.
- [4] Алфёров Ж. И., Васильев А. М., Иванов С. В., Копьев П. С., Леденцов Н. Н., Луценко М. Э., Устинов В. М. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1803—1807.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 29.08.1989
Принято к печати 6.09.1989

ФТП, том 24, вып. 2, 1990

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ТУННЕЛИРОВАНИИ

В (Al, Ga)As—GaAs-ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ДВОЙНЫМ БАРЬЕРОМ

Алфёров Ж. И., Журавлева В. В., Иванов С. В., Копьев П. С.,
Корольков В. И., Леденцов Н. Н., Мельцер Б. Я., Табаров Т. С.

С развитием твердотельной электроники важное значение приобрело исследование эффектов туннелирования электронов через тонкие и сверхтонкие барьеры [1].

В настоящее время наиболее перспективными для сверхбыстродействующей микроэлектроники и СВЧ техники с потенциальными временами переключения в субпикосекундном диапазоне считаются приборы на основе гетероструктур с квантовой ямой, ограниченной двумя барьерами (ДБГС). В таких структурах наблюдается резонансное туннелирование носителей заряда — твердотельный аналог эффекта Рамзауера [2]. Задача о резонансном туннелировании частиц подробно рассмотрена в квантовой механике [3]. Применительно к твердотельным приборам использование туннелирования электронов через двойной барьер было предложено, насколько нам известно, в [4]. Вскоре [5] были теоретически рассмотрены эффекты, связанные с резонансным туннелированием электронов в таких структурах. Аналогичный вопрос обсуждался в [6] в предположении, что высота барьера определяется шириной запрещенной зоны диэлектрической прослойки. Исходя из современных представлений [7] высота барьеров определяется величиной разрыва зоны проводимости для электронов или величиной разрыва валентной зоны для дырок и может быть как существенно меньше, так и больше ширины запрещенной зоны материала барьера.

Подробно эффекты резонансного туннелирования рассматривались Эсаки [1, 7], который экспериментально продемонстрировал их для GaAs—(Al, Ga)As—

гетероструктур, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МПЭ) и развил концепцию искусственных сверхрешеток.

Обычно для исследования эффектов резонансного туннелирования используются структуры, выращенные на проводящих подложках. Это обусловлено тем, что включение большого последовательного сопротивления может существенно ухудшить приборные характеристики ДБГС, если последовательное

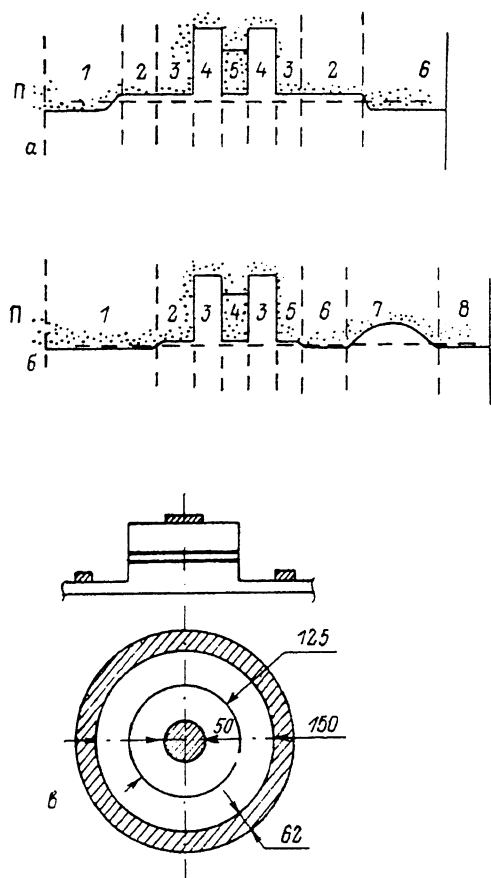


рис. 1. Энергетические диаграммы для зоны проводимости структур 1 (а) и 2 (б).

П — подложка GaAs : Cr; а) 1 — 1 мкм GaAs : Si, $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 — 0.4 мкм GaAs : Si, $n = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 — 2000 Å нелегированного GaAs; 4 — 85 Å $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, специально не легирован; 5 — 56 Å GaAs, специально не легирован; 6 — 0.5 мкм GaAs : Si, $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; б) 1 — 1 мкм GaAs : Si, $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 — 400 Å GaAs, специально не легирован; 3 — 85 Å $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, специально не легирован; 4 — 56 Å GaAs, специально не легирован; 5 — 200 Å GaAs, специально не легирован; 6 — 300 Å GaAs : Si, $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 7 — 0.7 мкм GaAs, специально не легирован, $N_D + N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 8 — 0.2 мкм GaAs : Si, $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; в) конструкция меза-структур, использованных для измерений. Размеры в микрометрах.

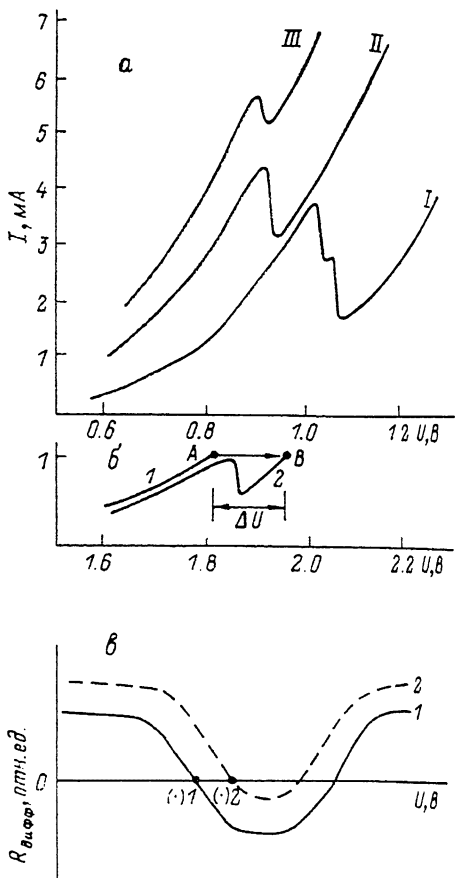


Рис. 2.

а — структура 1. ВАХ при T, К: I — 110, II — 225, III — 300. б — структура 2. ВАХ при освещении (1) и в темноте (2). Наблюдается перегибание прибора А → В. T = 77 К. в — дифференциальное сопротивление при освещении (1) $R_{\Sigma} = R^0 - \Delta R_{\Phi\Pi}$ и в темноте (2) $R_{\Sigma} = R^0$.

сопротивление пассивных областей превышает величину отрицательного дифференциального сопротивления ДБГС.

Вместе с тем для современной микроэлектроники оптимальным является создание элементной базы на полужизолирующих подложках.

Исследованные структуры были выращены методом МПЭ [8] на полужизолирующих подложках GaAs (100), легированных хромом, при температуре подложки 630 °C в обогащенных As условиях роста.

Энергетические диаграммы для зоны проводимости структур представлены на рис. 1, а, б. Структура 2, изображенная на рис. 1, б, отличалась от струк-

туры 1 (рис. 1, а) тем, что содержала слой высокоочищенного ($N_D + N_A \sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) GaAs, который использовался в качестве активной области фотоприемника. Из пластин при помощи фотолитографии изготавливались меза-структуры (рис. 1, в).

На рис. 2, а представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) структуры при различных температурах измерения. Отмечается стабильное проявление падающего участка в ВАХ вплоть до комнатной температуры.

На рис. 2, б представлены темновые (кривая 2) и световые (кривая 1) характеристики структуры 2 при освещении гелий-неоновым лазером ($\hbar \omega_{\text{возб}} = 1.96 \text{ эВ}$, плотность возбуждения 0.5 Вт/см^2 , 77 К). При освещении полное сопротивление пары ДБГС—фотоприемник уменьшается:]

$$R_{\Sigma} = R^0 - \Delta R_{\text{фп}}, \quad (1)$$

где R_{Σ} — полное сопротивление пары, R^0 — сопротивление пары в темноте, $\Delta R_{\text{фп}}$ — уменьшение сопротивления фотоприемника при освещении. Как следует из рис. 2, в, уменьшение светового потока приводит к сдвигу точки обращения R_{Σ} в нуль в сторону больших напряжений.

В том случае, если при освещении рабочая точка (А, рис. 2, б) находится вблизи точки обращения дифференциального сопротивления в нуль (максимум тока при освещении структуры), увеличение фотосопротивления при прекращении светового потока приведет к переключению ДБГС структуры, и при том же рабочем токе система переходит в состояние е, что сопровождается изменением напряжения

$$\Delta U = U_B - U_A. \quad (2)$$

Таким образом, для ДБГС структур, выращенных на полуизолирующих подложках, в ВАХ вплоть до комнатных температур наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления. Впервые наблюдался эффект переключения ДБГС структуры под действием оптического излучения, что может быть использовано при создании субпикосекундного оптоэлектронного ключа.

Список литературы

- [1] Эсаки Л. // УФН. 1975. Т. 116. В. 4. С. 569—583.
- [2] Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. М., 1966. 432 с.
- [3] Бом Д. Квантовая механика. М., 1985.
- [4] Mead C. A. // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. N 4. P. 646—652.
- [5] Davis R. H., Hosack H. H. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 4. P. 864—866.
- [6] Йогансен Л. В. // ЖЭТФ. 1963. Т. 45. В. 2 (8). С. 207—213.
- [7] Esaki L., Tsu R. // IBM J. Res. Dev. 1970. V. 14. N 1. P. 61—65.
- [8] Копьев П. С., Леденцов Н. Н. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 10. С. 1729—1742.

Получено 29.08.1989

Принято к печати 6.09.1989

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

ФТП, том 24, вып. 2, 1990

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}\langle\text{Xe}\rangle$

Барышев Н. С., Ибрагимова М. И., Хайбуллин И. Б.

В работе приведены результаты исследования влияния имплантированных ионов ксенона на электрические и фотоэлектрические свойства монокристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, подвергнутых длительному диффузионному термическому отжигу.