

Тиристоры на основе гетероструктур GaAs—AlGaAs с полностью оптической связью

© В.Г. Данильченко, В.И. Корольков, С.И. Пономарев, Ф.Ю. Солдатенков[¶]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 сентября 2010 г. Принята к печати 28 сентября 2010 г.)

Рассмотрены несколько вариантов тиристоров на основе гетероструктур GaAs—AlGaAs с оптической передачей эмиттерного тока. На основе результатов исследования $n-p-n$ - и $p-n-p$ -оптотранзисторов, в которых эмиттерный ток преобразуется в свет с последующим преобразованием света в ток коллектора, показана принципиальная возможность создания тиристоров с полностью оптической передачей эмиттерного тока. Приведены структуры таких переключателей. С учетом особенностей технологии получения нелегированных слоев GaAs и формирования на их основе высоковольтных p^0-n^0 -переходов с участием фоновых примесей для кардинального снижения времени задержки включения и повышения рабочих частот предложен и реализован коммутатор, имеющий три составных транзистора.

Известно, что тиристоры хорошо описываются двухтранзисторной моделью [1], согласно которой тиристор можно рассматривать как соединение $p-n-p$ -транзистора с $n-p-n$ -транзистором коллектор каждого из которых соединен с базой другого. Говоря о тиристорах с полностью оптической связью, мы имеем в виду, что в переключающей структуре в качестве составных транзисторов используются два оптотранзистора, т.е. реализуется оптическое взаимодействие между эмиттерными и коллекторными переходами.

Ранее нами было показано, что высокий внутренний квантовый выход излучательной рекомбинации, возможность управления шириной запрещенной зоны переключающей структуры в процессе эпитаксиального выращивания гетеропереходов GaAs—AlGaAs позволили по-новому подойти к разработке импульсных тиристоров [2,3]. Так, добавление пятого слоя к $p-n-p-n$ -гетероструктуре дало возможность эффективно управлять напряжением включения путем преобразования света в ток на коллекторном переходе. Такой подход не только упростил технологию создания управляющего электрода к тонкой базе, но и практически устранил этап распространения включенного состояния, что повысило быстродействие при включении.

Используя этот принцип управления напряжением включения, в работах [4,5] описаны высоковольтные коммутаторы (оптотиристоры), полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, в которых необходимая структура сформирована на полуизолирующем GaAs, служащем высокоомной базовой областью.

В тиристорах, получивших название фотонно-инжекционных коммутаторов, замена одного из составных транзисторов оптотиристором (рис. 1, а) позволила существенно улучшить динамические характеристики [3].

Однако в таких структурах далеко не полностью реализуются возможности внутрикристалльной оптической связи. Следует заметить, что применение внутренних

(или внешних) световых потоков все шире используется при разработке различных импульсных и мощных приборов [6,7].

В данной работе приведены результаты исследования переключающих структур на основе гетеропереходов GaAs—AlGaAs с полностью оптической передачей тока управления, а также структур с S -образной вольт-амперной характеристикой, содержащих три составных транзистора.

Для исследования возможности реализации переключающих структур с полностью оптической связью была использована двухтранзисторная модель, когда в качестве составных транзисторов взяты два оптотранзистора, представляющих структуры $P-p-N-p^0$ и $N-n-P-n^0$ (где P и N — слои $Al_xGa_{1-x}As$ p - и n -типа проводимости соответственно; p и n — слои GaAs p - и n -типа; p^0 и n^0 — слои слабо легированного GaAs, с концентрацией свободных носителей менее 10^{15} см^{-3}).

Работа оптотранзистора основана на преобразовании эмиттерного тока в свет и последующем преобразовании света в ток на коллекторном переходе. Как было показано в работе [8], при правильно выбранной зонной энергетической диаграмме транзистора (ходе ширины запрещенной зоны вдоль структуры) коэффициент передачи эмиттерного тока может достигать значений 0.65–0.75. На рис. 2 показаны зависимости коэффициента передачи α от величины тока эмиттера в схеме с общей базой для $p-n-p$ - и $n-p-n$ -оптотранзисторов. Из рисунка видно, что уже при токах $\sim 1-2 \text{ А/см}^2$ коэффициент передачи α превышает 0.5.

Небольшое различие коэффициентов передачи в области малых токов, по-видимому, связано с разницей внутренней квантовой эффективности излучательной рекомбинации p - и n -областей эмиттеров. Поскольку коэффициенты усиления по току имеют возрастающую зависимость от тока, зависимость $I(l - \alpha_{n-p-n} - \alpha_{p-n-p}) = f(I)$ имеет максимум, т.е. наблюдается участок отрицательного сопротивления. При напряжениях $U \approx 0.5U_t$ (где U_t — напряжение включения) эффективное управление начиналось с токов

[¶] E-mail: fsoldatenkov@mail.ioffe.ru

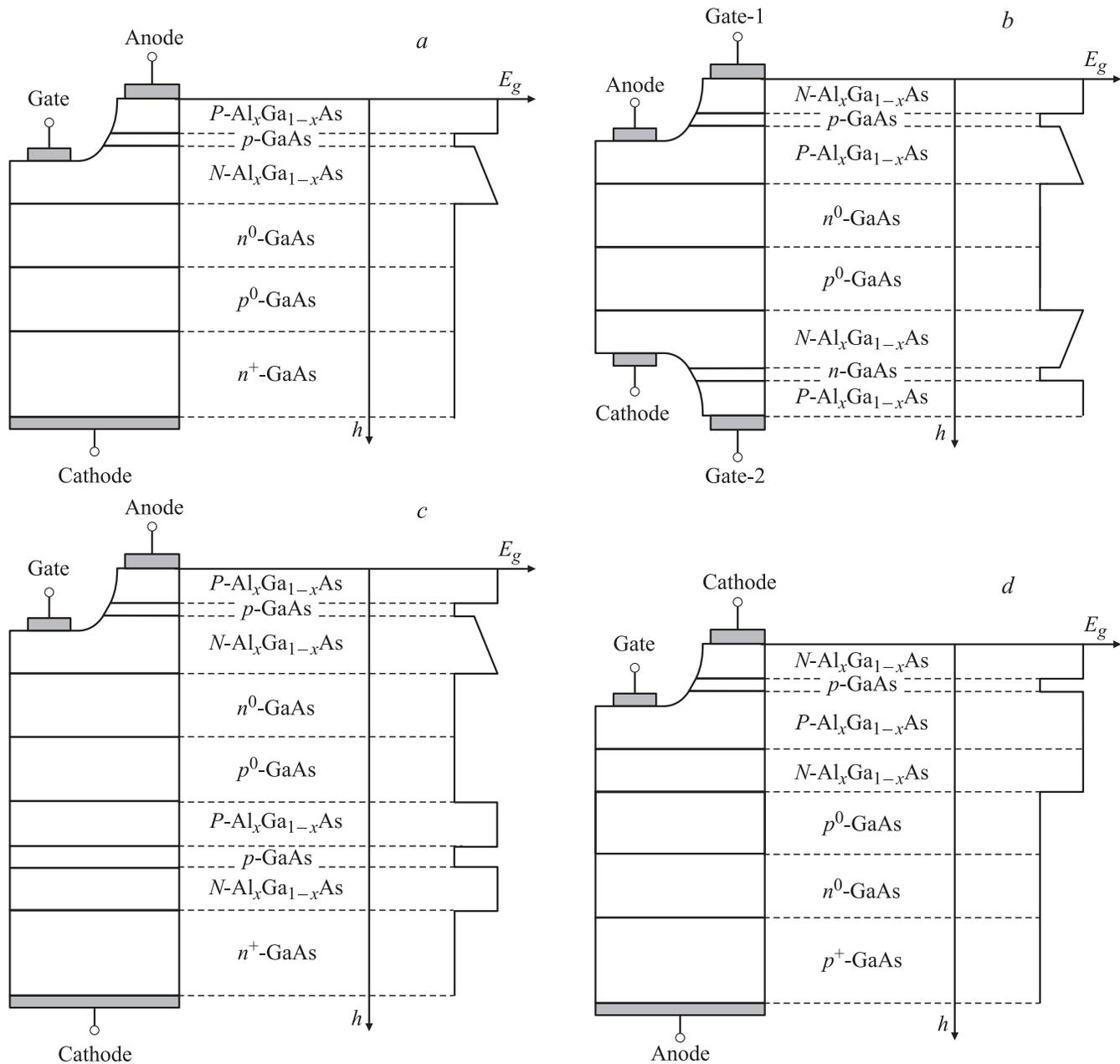


Рис. 1. Схематическое изображение зонных энергетических диаграмм и структур различных вариантов тиристоров с оптической передачей эмиттерного тока: *a* — традиционная структура тиристора [3]; *b* и *c* — тиристоры с полностью оптической передачей эмиттерного тока; *d* — переключающая структура с тремя составляющими транзисторами.

$j_c \approx 1 \text{ A/cm}^2$, а при токе $j_c \approx 20 \text{ A/cm}^2$ наблюдалась уже диодная характеристика.

Однако реализация монолитной структуры тиристора с использованием двух транзисторов с оптической передачей эмиттерного тока ($N-p-P-n^0$ и $P-n-N-p^0$) приводит к усложнению конструкции, поскольку необходимо изготавливать уже четыре вывода. На рис. 1, *b* показана зонная энергетическая диаграмма тиристора с полностью оптической связью. Исходя из необходимости получения высокого коэффициента передачи эмиттерного тока коллектор в таких транзисторах всегда должен иметь ширину запрещенной зоны меньше, чем

энергия света, излучаемого эмиттером. В рассматриваемом случае материалом коллектора должен быть GaAs. Поэтому были рассмотрены и изучены другие варианты структуры коммутаторов, зонные диаграммы которых показаны на рис. 1, *c* и *d*.

В структуре, изображенной на рис. 1, *c*, для формирования коллекторного $p-n$ -перехода базовые области составных оптотранзисторов имеют узкозонные слои, толщины которых существенно меньше соответствующей диффузионной длины, но достаточной для того, чтобы разместить область пространственного заряда при $U \approx 600-800 \text{ В}$.

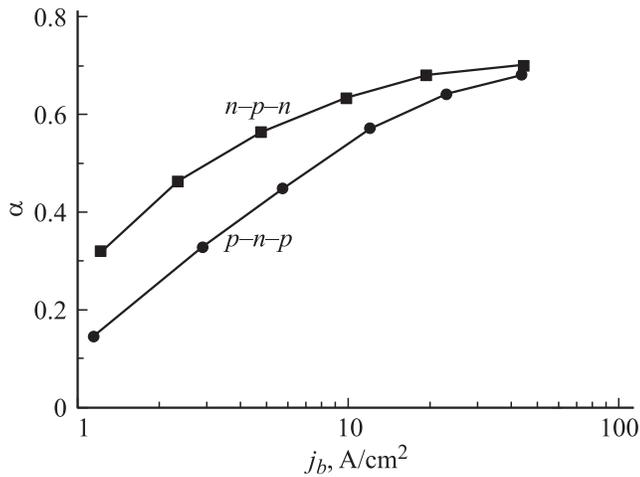


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи α от тока j_b для $p-n-p$ и $n-p-n$ -гетеротранзисторов.

При этом коэффициент передачи эмиттерного тока несколько уменьшается и равен $\alpha = \alpha_{\text{light}} \text{sech}(d_{n(p)}/L_{p(n)})$. Обычно диффузионные длины неравновесных носителей заряда (ННЗ) в нелегированном GaAs составляют для электронов $L_n = 10-12$ мкм, для дырок $L_p = 5-8$ мкм, а толщина слоя объемного заряда коллекторного перехода составляет $10-15$ мкм.

Исследование зависимости коэффициента передачи от тока эмиттера при различных значениях напряжения на коллекторном переходе показало, что α отличается от значений, показанных на рис. 1, на множитель $\sim 0.9-0.95$, так что необходимое условие для включения коммутатора $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$ вполне достижимо.

В такой структуре эмиттерными переходами являются два включенных в пропускном направлении светодиода. Положительная обратная связь между составляющими оптотранзисторами, приводящая к включению тиристора, обеспечивается за счет оптического взаимодействия между эмиттерными и высоковольтным коллекторным $p-n$ -переходами. В открытом состоянии светодиода выполняют функцию эмиттерных переходов и посредством света поставляют ННЗ к коллекторному переходу. Здесь также использование внутренних световых потоков приводит к значительному увеличению площади первоначального включения, росту максимально допустимой скорости нарастания анодного тока и уменьшению времени включения.

Еще один из вариантов тиристора с использованием световых потоков показан на рис. 1, *d*. Как обычно, коллекторный переход сформирован в слаболегированном эпитаксиальном слое арсенида галлия. В этой структуре два составляющих транзистора $N-p^0-n^0$ и $p^+-n^0-p^0$ имеют непосредственную связь между переходами. На N -эмиттере выращен излучатель $P-p-N$, в результате чего реализуется оптическая связь с p^0 -базой тиристора. Протекание тока через светодиод приводит к генерации квантов света с энергией $h\nu > E_g^{\text{GaAs}}$. Свет проходит через широкозонные слои N^+ и P^+

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и поглощается на гетерогранице N^+-p^0 с генерацией электронно-дырочных пар. Неосновные носители заряда (электроны) диффундируют через p^0 -базу и дают вклад в ток обратносмещенного коллекторного перехода. Светодиод, p^0 -база и коллекторный переход образуют оптотранзистор с оптической связью между переходами. Условие перевода тиристора в открытое состояние аналогично условию для тиристорov традиционной конструкции и имеет вид $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$, где α_i — коэффициент передачи по току i -го составляющего транзистора (с непосредственной или оптической связью), n — количество составляющих транзисторов, в данном случае $n = 3$.

Поскольку время задержки при включении тем меньше, чем больше сумма коэффициентов передачи превышает единицу поэтому в тиристорах с тремя составными транзисторами быстродействие при включении может быть повышено в 2–3 раза. Важно не только это обстоятельство. Все описываемые структуры были получены методом жидкофазной эпитаксии, когда слабо легированные p^0-n^0 -слои выращивались в кварцевой оснастке из ограниченного объема раствора–расплава GaAs в галлии. Легированный p^+ -слой и гетероструктура выращивались в графитовой кассете поршневого типа. Толщина n^0 -слоя составляла $30-40$ мкм, p^0 -слоя — $40-60$ мкм, N - и P -слоев — $10-20$ мкм. Площадь активной области тиристора $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ см². Изготовленные тиристоры имели допустимые напряжения до 1000 В, ток в закрытом состоянии при 20°C — менее 500 мкА, отпирающий ток управления — $10-50$ мА, остаточное напряжение — $6-8$ В.

Характерной особенностью получения нелегированных эпитаксиальных слоев GaAs и формирования высоковольтных p^0-n^0 -переходов методом ЖФЭ является участие остаточных (фоновых) примесей, управление характером распределения которых осуществляется выбором режима выращивания.

Обычно в слабо легированных слоях GaAs, выращенных методом ЖФЭ, присутствуют центры с глубокими уровнями $A(E_v + 0.4 \text{ эВ})$ и $B(E_v + 0.68 \text{ эВ})$, приводящие к образованию высокоомной области, примыкающей к p^0-n^0 -переходу со стороны p^0 -слоя. Поэтому в коммутаторах на основе таких высоковольтных p^0-n^0 -переходов всегда наблюдается частотная зависимость времени задержки включения.

Это связано с тем, что в стационарном состоянии область пространственного заряда (ОПЗ) формируется в окрестности области $N_{ds} = N_{as}$ (где N_{ds} и N_{as} — концентрации мелких доноров и акцепторов соответственно), а уровни A и B в ОПЗ заняты электронами. При подаче тока управления происходит захват дырок и перезарядка центров. Перезарядка уровней и увеличение плотности отрицательного объемного заряда приводит к смещению центра ОПЗ в точку, где $N_{aa} = N_{ds}$ (N_{aa} — концентрация глубоких акцепторов). Фактически это означает, что эффективные толщины базовых областей

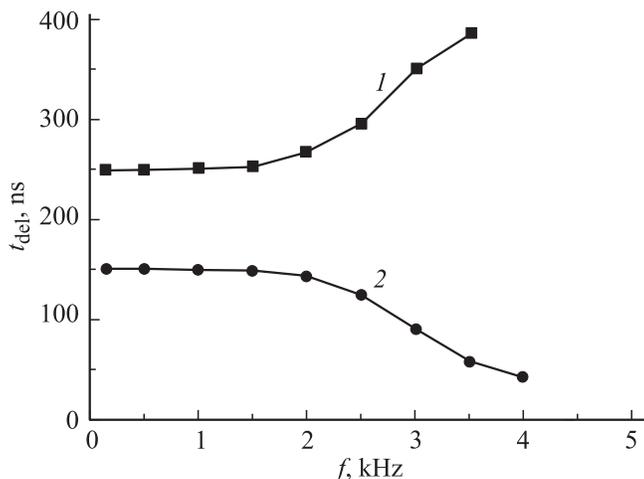


Рис. 3. Частотные зависимости времени задержки включения для тиристорных структур на основе нелегированного GaAs при токах управления $j_c \approx 1 \text{ A/cm}^2$ и напряжениях $U \approx 0.5U_i$: 1 — гомо- $p-n-p-n$ -структура; 2 — структура, показанная на рис. 2, d .

меняются: p^0 — увеличивается, а n^0 — уменьшается. Поэтому на повышенных частотах, когда период следования импульсов меньше времени перемещения ОПЗ, в тиристорах с двумя составляющими транзисторами время задержки возрастает, так как эффективность $p^+-n^0-p^0$ -транзистора резко уменьшается.

Понятно, что в зависимости от толщины нелегированной области, профиля $|N_{ds}-N_{as}| = f(x)$, этим процессом можно управлять. В то же время снижение толщины нелегированной области приводит к падению напряжения переключения.

В тиристорах с тремя составляющими транзисторами (рис. 1, d) время задержки с ростом частоты снижается, так как уменьшается эффективная толщина p^0 -базы за счет генерации электронно-дырочных пар на p^0-N -границе.

Для сравнения тиристорных структур на основе арсенид-галлиевой $p^+-n^0-p^0-n^+$ -структуры, имеющей два составных транзистора, с приборами, имеющими три составляющих транзистора, на рис. 3 приведена зависимость времени задержки от частоты. Толщины слабо легированных p - и n -областей одинаковы, структуры имеют близкие статические напряжения переключения ($U \approx 800 \text{ В}$). Видно, что рассмотренная структура (рис. 1, d) обладает значительно меньшим временем задержки, уменьшающимся по мере роста частоты следования импульсов.

Таким образом, рассмотренные тиристоры имеют повышенное быстродействие при включении и улучшенные частотные свойства. Необходимо заметить, что увеличение количества эмиттерных переходов, а также наличие туннельного контакта $N-P$ приводят к возрастанию напряжения в открытом состоянии до 8–9 В. Поэтому такие ключи целесообразно использовать в качестве быстродействующих переключателей при работе в режимах с малой длительностью импульсного тока.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность Ж.И. Алфёрову за интерес и внимание к работе.

Список литературы

- [1] J.J. Ebers. Proc. IRE, **40**, 1361 (1952).
- [2] В.И. Корольков, В.Г. Никитин, Н. Рахимов. Письма ЖТФ, **2** (20), 941 (1976).
- [3] Ж.И. Алфёров, В.М. Ефанов, Ю.М. Задиранов, А.Ф. Кардосысов, В.И. Корольков, С.И. Пономарёв, А.В. Рожков. Письма ЖТФ, **12** (21), 1281 (1986).
- [4] J.H. Hur, P. Hadizad, S.G. Hummel, K.M. Dzurko, P.D. Dapcus, H.R. Fetterman, M.A. Gundersen. IEEE Trans. Electron. Dev., **37** (12), 2520 (1990).
- [5] J.H. Zhao, T. Burke, D. Larson, M. Weiner, A. Chin, J.M. Ballingall, T. Yu. IEEE Trans. Electron. Dev., **40**, (4), 817 (1993).
- [6] И.А. Жебулев, В.И. Корольков, В.Г. Никитин, Н.Ю. Орлов, Т.С. Табаров. Письма ЖТФ, **19** (15), 39 (1993).
- [7] Tsai-Sheng Liao, P. Yu, O. Zucker. Proc. 6th Int. Conf. Solid-State and Integrated Circuit Technology (Shanghai, China, 2001) p. 143.
- [8] В.М. Андреев, Ю.М. Задиранов, В.И. Корольков, А.В. Рожков, А.А. Яковенко. ФТП, **17** (9), 1618 (1983).

Редактор Л.В. Беляков

Thyristors on the base of GaAs–AlGaAs heterostructures with completely optical transferring of emitter current

V.G. Danil'chenko, V.I. Korol'kov, S.I. Ponomarev, F.Yu. Soldatenkov

loffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Several types of optothyristors based on heterostructures GaAs–AlGaAs were considered. A principal probability was shown to create thyristors with a completely optical transferring of emitter current to collector that. Structures with optothyristor switches were demonstrated. There were realized an optothyristor switch comprising of 3 integral high-voltage GaAs $p-n$ -junctions providing a short delay time and increasing frequency.