

06;12

## Исследование температурной стабильности пикосекундных арсенидгаллиевых динисторных коммутаторов

© К.В. Евстигнеев, В.И. Корольков, А.В. Рожков

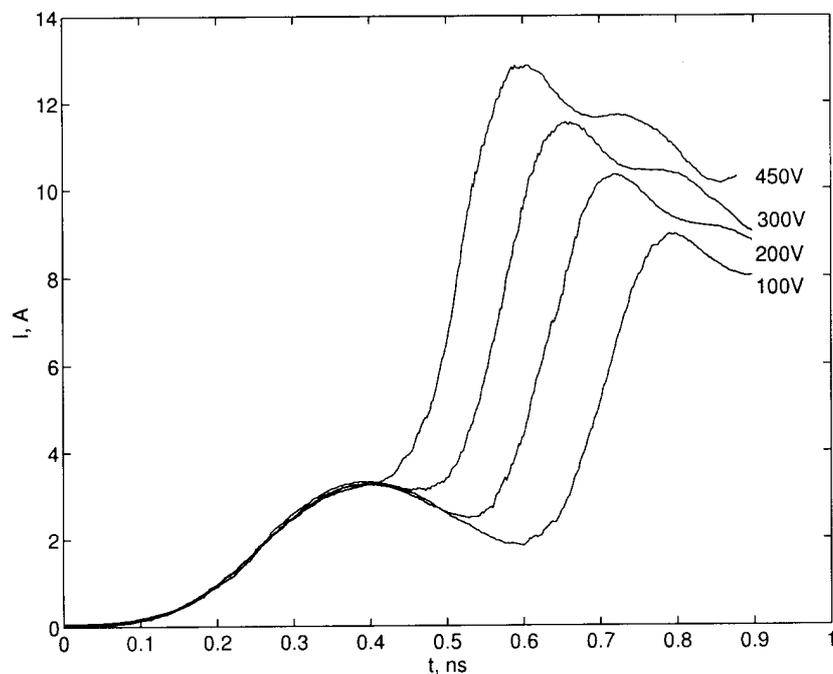
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 2 марта 1998 г.

Экспериментально продемонстрирована работа GaAs  $n^+ - p - i - n^0 - p^+$  динисторных структур в режиме обратимого лавинного пробоя при температуре до 200°C с сохранением времени переключения менее 140 ps. Проведенное численное моделирование позволило уточнить влияние различных параметров полупроводника на температурную зависимость характеристик коммутации.

Среди известных мощных быстродействующих коммутаторов пикосекундного диапазона к особому классу принадлежат приборы, работающие на основе принципа переключения с помощью задержанной ударно-ионизационной волны. Такие полупроводниковые ключи, как правило, не имеют стационарной  $S$ -образной вольт-амперной характеристики и работают в режиме обратимого динамического пробоя высоковольтного  $p-n$  перехода. Динамический пробой сопровождается неоднородным распределением тока по площади с образованием шнуров высокой плотности тока и, как следствие, заметным увеличением температуры в области  $p-n$  перехода. Оба эти фактора накладывают сильные ограничения на рабочие характеристики структур, формируемых на основе кремния. В связи с этим особый интерес вызывают результаты исследования приборов, изготовленных на основе иных, более широкозонных материалов.

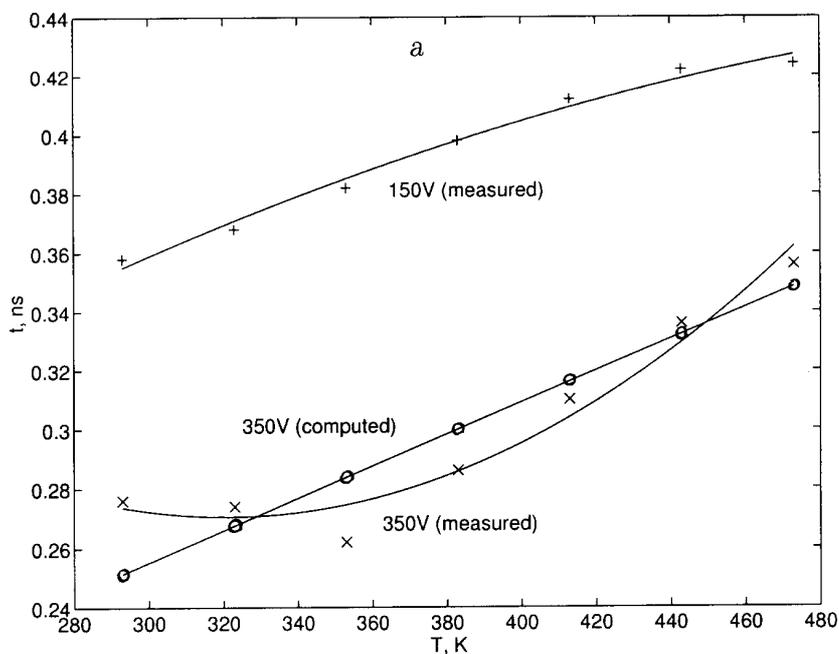
Нами выполнены исследования температурной стабильности высоковольтных коммутаторов на основе  $n^+ - p - i - n^0 - p^+$  GaAs динисторной структуры. Центральный высоковольтный плавный  $p-i-n^0$  переход выращивался методом жидкофазной эпитаксии. Формирование перехода происходило благодаря изменению концентрации фоновых донорных



**Рис. 1.** Осциллограммы тока через обостряющий динистор при разных напряжениях смещения.

и акцепторных примесей. Для таких структур характерны дефекты типа "antisite" с двумя уровнями в нижней половине запрещенной зоны и концентрацией  $(0.5-2) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  [1]. При комнатной температуре максимальное статически удерживаемое прямое напряжение составляло 600–800 V. Коэффициент положительной обратной связи между эмиттерными переходами был менее 1 при напряжениях вплоть до пробойного. Площадь приборной структуры —  $0.5 \text{ mm}^2$ .

Измерение основных параметров переключения приборов производилось при их работе в режиме обострителя импульса тока. Обостряемый импульс имел на  $50 \Omega$  нагрузке амплитуду 400 V и время нарастания 0.3 ns при временной стабильности лучше 30 ps. Этот импульс вместе с постоянным смещением подавался на  $50 \Omega$  линию, в разрыв которой был



**Рис. 2.** Зависимость задержки (а) и времени (b) переключения от температуры при разных напряжениях смещения

включен исследуемый динистор. К другому концу линии подключалась согласованная нагрузка. При комнатной температуре эффект быстрого переключения наблюдался в диапазоне напряжений смещения от 90 В практически до напряжения статического пробоя. Время перехода в проводящее состояние составляло около 100 ps при задержке относительно входного импульса 0.1–0.4 ns (рис. 1).

Как и предполагалось, рассматриваемый коммутатор показал существенно лучшую термостойкость по сравнению с известными кремниевыми пикосекундными переключателями, для которых предел рабочей температуры не превышал 100°C. В то же время нагрев арсенидгаллиевых динисторов до 200°C вызывал лишь рост задержки переключения и небольшое падение амплитуды тока. Температурные зависимости

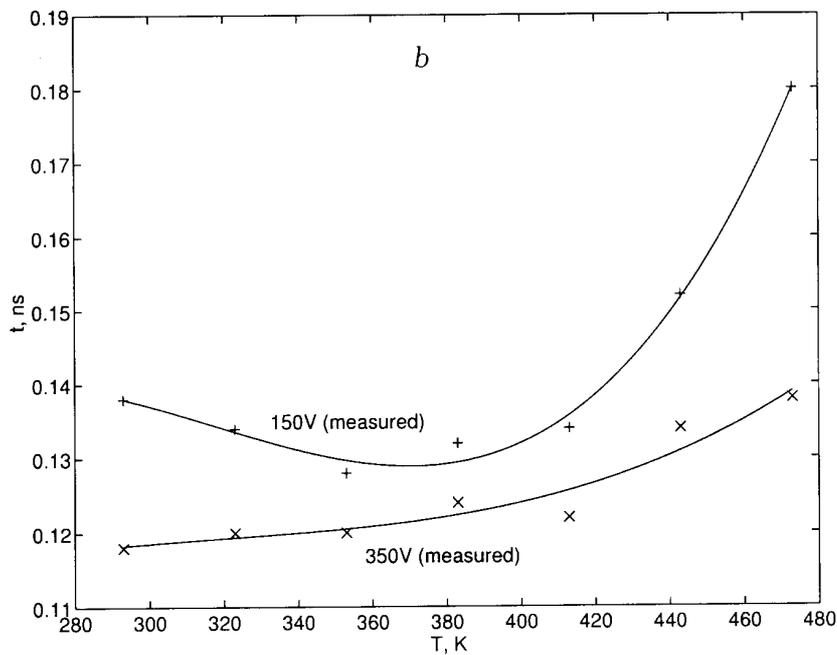


Рис. 2 (продолжение).

задержки момента переключения относительно обостряемого импульса показаны на рис. 2, *a*, где хорошо видна характерная особенность этого параметра — рост при увеличении температуры и уменьшении напряжения смещения. С нагревом становится больше (на 10–15%) и длительность фронта обостренного импульса (рис. 2, *b*). На этом рисунке заметно значительное замедление процесса переключения с ростом температуры при напряжении смещения 150 V. Это объясняется тем, что минимальное постоянное напряжение смещения, обеспечивающее режим обострения, при комнатной температуре не превышало 90 V, но при 200°C приближалось к 130–150 V. Важно отметить, что нестабильность времени задержки переключения (jitter) практически не зависела от температуры прибора. Для большинства температур и напряжений смещения она составляла 30 ps. Исключение составляли наиболее малые — близкие к нижнему порогу режима обострения, и

наиболее большие — близкие к напряжению статического переключения величины постоянного смещения, где нестабильность возрастала до 120–150 ps. Такое поведение временной нестабильности в пограничных районах вообще характерно для арсенидгаллиевых диодных [2] и тиристорных [3] структур.

Для выяснения картины переключения рассматриваемого коммутатора было проведено численное моделирование пробоя базовых областей прибора. В качестве модельной использовалась диодная  $p-i-n^0$  структура, подобная базовым областям нашего диодистора. При проведении моделирования учитывались дрейф, диффузия, рекомбинация и термогенерация (в простейшем представлении зона-зона), ударная ионизация. Динамика процессов описывалась системой уравнений непрерывности

$$\begin{cases} \frac{dE}{dt} = \frac{4\pi}{\epsilon} [J - e(j_p - j_n)] \\ \frac{dp}{dt} = t - r(p, n) + g(E, p, n) - \frac{\partial}{\partial x} [pv_p(E)] + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \\ \frac{dn}{dt} = t - r(p, n) + g(E, p, n) - \frac{\partial}{\partial x} [nv_n(E)] + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \end{cases}$$

где  $E$  — напряженность электрического поля;  $J$  — плотность полного тока через прибор, определяемая внешней схемой и геометрией приборной структуры;  $j_p$  и  $j_n$  — плотности токов частиц;  $t$ ,  $r$  и  $g$  — скорости термической генерации, рекомбинации и ударной ионизации соответственно. В качестве коэффициента ударной ионизации бралась довольно комплексная аппроксимация, приведенная в [4].

В предположении однородной по площади модуляции проводимости высокоомной области прибора нам не удалось получить количественного согласия расчетных и экспериментальных зависимостей тока через прибор от времени. Но в соответствии с теоретическим исследованием стабильности волн ударной ионизации в  $p-p$  переходах [5] предположение об однородности пробоя оказывается несколько нереалистичным. В рассматриваемом приборе волна поперечно неустойчива (хоть и в меньшей степени, чем в резкой  $(p^+ - i - n^+)$  структуре), и пробой должен иметь локальный характер. Путем подгонки под экспериментальные результаты было установлено, что в проводящее состояние переходит около 0.25 всей площади центрального перехода, что также учитывалось при проведении моделирования.

В соответствии с численным расчетом при росте температуры должна увеличиваться задержка включения динистора (рис. 2, *a*), а время переключения должно оставаться практически постоянным. Причем изменение вида импульса тока через прибор оказалось следствием только температурной зависимости коэффициентов ударной ионизации. Уменьшение подвижностей и коэффициентов диффузии практически не сказывается на внешних характеристиках коммутации. Постоянство времени переключения объясняется тем, что в TRAPATT-режиме скорость нарастания тока через прибор есть в основном функция параметров внешней цепи и геометрических размеров самого прибора. Рост задержки включения получается в результате увеличения пороговой напряженности поля, необходимой для развития пробоя. В свою очередь увеличение порогового поля является следствием уменьшения коэффициентов ударной ионизации, что также может служить причиной роста потерь во включенном состоянии.

Таким образом, результаты экспериментального исследования и численного моделирования свидетельствуют об успешной работе арсенидгаллиевых динисторных обострителей при повышенной температуре. В соответствии с результатами моделирования изменение динамических параметров происходит лишь вследствие термической зависимости коэффициентов ударной ионизации. Какого-либо существенного влияния изменения коэффициентов переноса носителей заряда не обнаружено вплоть до 200°C.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить признательность С.В. Шендерею за многочисленные дискуссии и полезные обсуждения экспериментальной части выполненных исследований.

## Список литературы

- [1] Задиранов Ю.М., Корольков В.И., Пономарев С.И. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 4. С. 771–777.
- [2] Алферов Ж.И., Грехов И.В., Ефанов В.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 18. С. 1089–1093.
- [3] Корольков В.И., Прохоренко А.С., Рожков А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 10. С. 26–31.
- [4] Hin-Fai Ch., Dmitris P. // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. N 2. P. 531–538.
- [5] Минарский А.М., Родин П.В. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 4. С. 432–436.