

06.2

## Высоковольтные арсенидгаллиевые диоды с субнаносекундными временами восстановления блокирующего напряжения

© В.И. Корольков, А.В. Рожков, Л.А. Петропавловская

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

Поступило в Редакцию 4 апреля 2001 г.

Представлены результаты исследования высоковольтных арсенидгаллиевых диодных переключателей с характерными субнаносекундными временами спада обратного тока при переключении их из прямого смещения на обратное. Исследованные структуры имели близкое к диодам с накоплением заряда распределение концентрации примеси в базовых областях и работали в режимах, соответствующих режимам включения кремниевых высоковольтных дрейфовых диодов с резким восстановлением. Показаны перспективы использования представленных арсенидгаллиевых диодов для формирования импульсов с фронтом в несколько сотен пикосекунд на токи в сотни ампер и напряжения в несколько киловольт, с частотами в сотни килогерц.

Большинство полупроводниковых переключателей с положительной обратной связью по току (лавинные транзисторы, тиристоры, динисторы и др.) весьма чувствительны к эффектам локализации тока [1,2]. Как правило, неоднородность включения приводит к катастрофически развивающейся деградации и выходу переключателя из строя. Токосвая неустойчивость отсутствует в переключателях, коммутационные процессы в которых происходят за одно пролетное время носителей через базовую область. Этому классу переключателей принадлежат диоды с накоплением заряда (ДНЗ) [3], дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ) [4] и иные диодные структуры, используемые при формировании импульсов с крутыми фронтами.

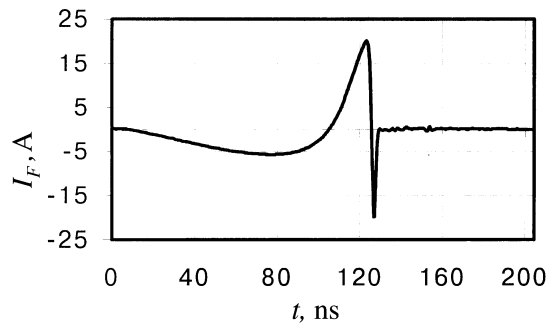
Исследованные нами  $p^+ - p - i - n - n^+$ -диодные структуры изготавливались методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема раствора-расплава арсенида галлия в галлии. Профиль распределения концентрации примесей в  $-p$ ,  $-i$ ,  $-n$ -областях имел характерный для

ДНЗ вид [3], когда градиент концентрации в базовых областях достигает трех порядков: при концентрации остаточной примеси  $\ll 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в  $i$ -области и  $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  на границе  $n-n^+$ -областей. Геометрические размеры изготовленных диодов соответствовали следующим значениям:  $W_p = 30 \text{ мкм}$ ;  $W_i + W_n = 60 \text{ мкм}$ ;  $\varnothing$  (диаметр диода)  $\cong 1 \text{ мм}$ . Измеренные методом Лэкса времена жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в  $n$ -базе ( $\tau_p$ ) не превышали 100 ns. Максимальные блокирующие напряжения диодов составляли  $\sim 1 \text{ кВ}$ .

Процесс формирования импульсов диодными переключателями подробно рассматривался в [3–5] и, как известно, состоит из двух характерных этапов. Так как особенности этих этапов важны для понимания проведенных нами экспериментов, а задающие режим переключения параметры будут использованы при описании полученных результатов, остановимся кратко на характеристике каждого из этапов.

На первом этапе через диод протекает импульс прямого тока, длительность ( $t_F$ ) и амплитуда ( $I_F$ ) которого определяют эффективность диффузионной модуляции базовой области. Глубина проникновения ННЗ в базу ( $L_D$ ) ограничивалась ( $L_D \ll W$ , где  $W$  — размер базовой области) как длительностью импульса прямого тока ( $t_F \leq \tau_p$ ), как это делается в ДДРВ, так и электрическим полем, препятствующим диффузии ННЗ в глубь базы, благодаря градиенту концентрации легирующей примеси, как это происходит в ДНЗ. Вместе с тем величина накопленного в диффузионной области заряда контролировалась амплитудой прямого тока, плотность которого изменялась от 20 до 500 А/см<sup>2</sup>. В нашем случае длительность импульсов прямого тока составляла  $\sim 100 \text{ пс}$  (рис. 1), а величина накопленного при протекании прямого тока заряда  $Q_F$  находилась в интервале (50–250) нС.

На втором этапе при переключении диодной структуры из прямого смещения на обратное начинается рассасывание ННЗ в диффузионной области. Скорость ухода дырок через  $p-n$ -переход задается преимущественно скоростью нарастания обратного тока, т. е. параметрами импульса обратного напряжения. В наших экспериментах минимальное время нарастания обратного напряжения ( $t_R$ ) составляло 20 ns (рис. 1), что существенно меньше времени жизни ННЗ в базе. Поскольку в диодных переключателях заряд, перенесенный обратным током  $I_R$ , соответствует заряду  $Q_F$ , то значение амплитуды обратного тока к моменту спада концентрации дырок до нулевого значения ( $t_0$ ) строго контролируется амплитудой и длительностью прямого тока. С момента  $t_0$  начинается

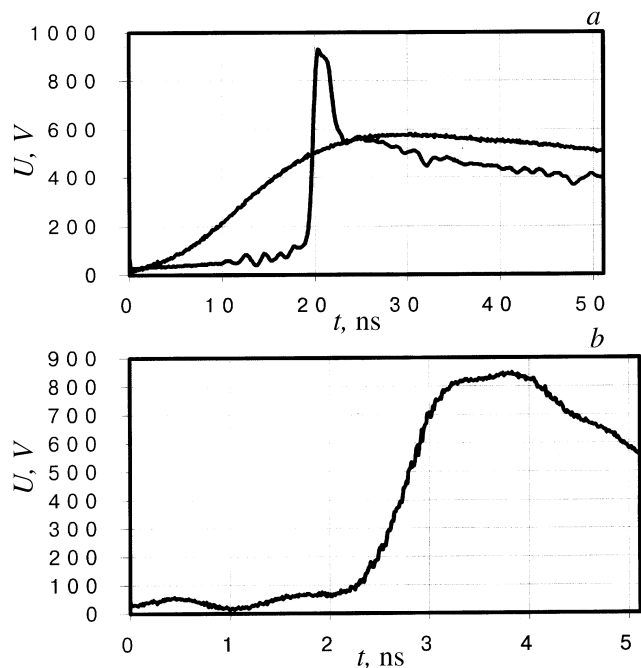


**Рис. 1.** Токовая осциллограмма, характеризующая два этапа переключения арсенидгаллиевых  $p^+ - p - i - n - n^+$ -диодных структур.

процесс восстановления напряжения на появившейся области пространственного заряда (ОПЗ). А интервал времени фазы спада обратного тока соответствует фронту нарастания  $\Delta t$  импульса напряжения, формируемого на нагрузке. На рис. 2 показаны осциллограммы импульсов напряжения, формируемого на  $50 \Omega$  нагрузке, а также осциллограмма исходного переключающего импульса. Приведенные осциллограммы свидетельствуют о субнаносекундных временах нарастания напряжения на диоде. Эти времена соответствуют дрейфовой скорости носителей в базе  $V_n = j/q(p+n)$ , максимальные значения которой ограничиваются скоростью насыщения  $V_s = 10^7$  cm/s.

Можно было ожидать, что исследуемые диоды с иным по сравнению с известными кремниевыми ДДРВ характером распределения примеси в базе будут иметь более сложный характер зависимости скорости дрейфа от плотности обратного тока, учитывая переменный профиль концентрации легирующей примеси в базе. Тем не менее общие с кремниевыми ДДРВ тенденции зависимости скорости восстановления напряжения  $dU/dt$  сохранились и в арсенидгаллиевых диодных переключателях. Так, увеличение плотности обратного тока и амплитуды обратного напряжения приводили к увеличению  $dU/dt$ , а увеличение времени нарастания амплитуды обратного напряжения  $t_R$  — к уменьшению  $dU/dt$ . Вместе с тем был установлен ряд особенностей.

1. Увеличение обратного тока не приводило к ограничению скорости восстановления напряжения  $dU/dt$  в широком диапазоне плотностей обратного тока, вплоть до  $2000$  A/cm<sup>2</sup>. Соотношение между значениями напряжения в моменты начала процесса нарастания блокирующего напряжения  $t_0$  и его завершения  $t_0 + \Delta t$  оставалось практически неиз-



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения на  $50 \Omega$  нагрузке: *a* — исходного переключающего импульса; *b* — формируемого при переключении арсенидгаллиевых  $p^+ - p - i - n - n^+$ -диодных структур.

менным в широком диапазоне плотностей обратного тока. Характерный ”пьедестал”, предшествующий субнаносекундному росту напряжения, не превышал (75–80) V при плотностях обратного тока  $1500 \text{ A/cm}^2$ .

2. Длительность процесса восстановления обратного напряжения достигает субнаносекундных времен начиная с плотностей обратного тока  $\sim 100 \text{ A/cm}^2$  и составляет не более  $0.5 \text{ ns}$  при плотности обратного тока  $2000 \text{ A/cm}^2$ .

3. Несмотря на малые времена жизни ННЗ в базовой  $n$ -области ( $\tau_p \leq 100 \text{ ns}$ ), отмечена зависимость скорости нарастания обратного напряжения от длительности импульса прямого тока. Так, если при длительности импульса прямого тока  $t_F \sim \tau_p$  длительность времени восстановления обратного напряжения составляла несколько сотен пикосекунд уже при плотностях обратного тока  $\geq 100 \text{ A/cm}^2$ , то для

режима "накачки" прямым постоянным током времена восстановления составляли более 2 ns даже при плотности обратного тока  $\sim 1000 \text{ A/cm}^2$ .

Приведенные результаты показали возможность использования эффекта полевого релаксации ННЗ в арсенидгаллиевых диодах при формировании высоковольтных импульсов субнаносекундного диапазона. Примечательным является то, что диапазон рабочих плотностей тока доведен до  $2000 \text{ A/cm}^2$  и повышен по сравнению с кремниевыми ДДРВ более чем на порядок. Современная технология изготовления арсенидгаллиевых высоковольтных  $p-n$ -переходов обеспечивает достаточную однородность по площади их инжекционных и блокирующих свойств, что делает возможным изготовление диодов диаметром до 5 mm и более. Такие диоды будут способны коммутировать токовые импульсы в несколько сотен ампер. Наши первые эксперименты показали, что последовательная сборка трех диодных переключателей обеспечивает синхронное их включение при амплитуде формируемых импульсов до 2.5 kV. Требуются дальнейшие работы, направленные на повышение максимальных значений коммутируемой мощности.

В ходе экспериментов диодные переключатели работали при температурах, значительно превышающих  $100^\circ\text{C}$ . А это тем более важно, так как даже при небольших коэффициентах теплопроводности GaAs высокие рабочие температуры позволяют рассчитывать на сохранение описанных свойств, в том числе при весьма значительных частотах повторения импульсов. Оценки показывают, что предельные частоты, ограниченные тепловыделением, могут составить несколько сотен килогерц.

Авторы признательны В.А. Козлову за полезные дискуссии на предварительной стадии работы и С.В. Шендерею за полезные консультации, интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

## Список литературы

- [1] *Гаряинов С.А., Абезгауз И.Д.* Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.: Энергия, 1970. 320 с.
- [2] *Горбатько А.В.* Препринт 962. Л., 1985. 61 с.
- [3] *Еремин С.А., Мокеев О.К., Носов Ю.Р.* Полупроводниковые диоды с накоплением заряда. М.: Сов. радио, 1966. 142 с.
- [4] *Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерея С.В.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 7. С. 435–439.
- [5] *Тучкевич В.М., Грехов И.В.* Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л.: Наука, 1988. 115 с.