

©1995 г.

ТОКОВАЯ И ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТИ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВО ВКЛЮЧЕННОМ СОСТОЯНИИ ФОТОННО-ИНЖЕКЦИОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОММУТАТОРОВ

*В.И.Корольков, Н.Ю.Орлов, А.В.Рожков,
Ф.Ю.Солдатенков, М.Н.Степанова*

Физико-технический институт им А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 20 июля 1994 г. Принята к печати 26 июля 1994 г.)

Изучены характеристики высоковольтных фотонно-инжекционных импульсных коммутаторов на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs во включенном состоянии. Показано, что остаточное напряжение на фотонно-инжекционном импульсном коммутаторе непосредственно после субнаносекундного включения локализовано на p^0 -слое и части i -слоя, не занятой областью пространственного заряда. Проводимость этих областей не успевает модулироваться неосновными носителями на этапе задержки включения. Установлено, что значение остаточного напряжения непосредственно после включения коммутатора находится в диапазоне (20–60) В в зависимости от электрофизических параметров нелегированных слоев прибора. Оно уменьшается до величин в единицы вольт за счет сравнительно медленного (в сотни наносекунд) диффузионно-дрейфового переноса неосновных носителей заряда, инжектированных n^+ -подложкой.

К настоящему времени в ряде работ [1–3] изучены основные закономерности работы мощных импульсных фотонно-инжекционных коммутаторов (ФИИК) на основе GaAs/AlGaAs. ФИИК обеспечивают на 50-омной нагрузке импульсы с амплитудой до 60 В с фронтами нарастания (0.2–0.5) нс при частотах повторения до 200 кГц, а на низкоомной нагрузке — токи до 150 А.

Работа ФИИК (рис. 1, *a, b*) основана на преобразовании управляющего электрического сигнала I_1 в $P-p-N$ -гетеросветодиоде в световой сигнал с последующим преобразованием света в выходной электрический сигнал I_2 в $N-n-i-p-n$ -фототранзисторе. При этом как в тиристорном (рис. 1, *a*), так и в транзисторном (рис. 1, *b*) режимах включения при достаточно большом напряжении на ФИИК величина тока I_2 определяется параметрами схемы включения и не зависит от тока I_1 [1].

Однако обращает на себя внимание тот факт, что потери полезного сигнала на активной нагрузке в коммутационной схеме с использованием ФИИК составляют от десятков вольт при токах менее 10 А [1]

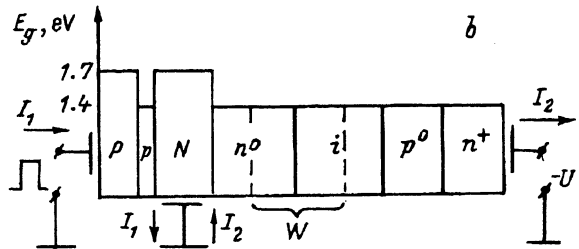
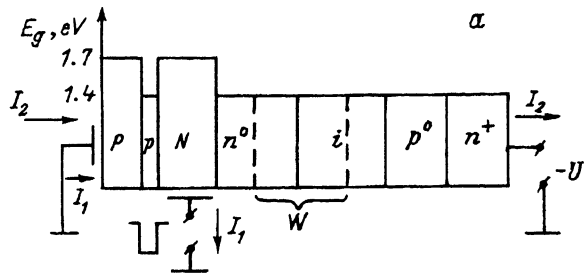


Рис. 1. Схематическое изображение ФИИК и его включения по тиристорной (а) и транзисторной (б) схемам. E_g — ширина запрещенной зоны, W — область пространственного заряда.

до сотен вольт при токах 50 А и более [2]. Кроме схемотехнических аспектов работы коммутационной схемы, связанных с электрическим рассогласованием и потерями на паразитных элементах схемы при высоких значениях dI/dt , существенный вклад в эти потери может вносить остаточное напряжение (ОН) на структуре ФИИК. Цель данной работы — экспериментальное изучение закономерностей образования ОН на ФИИК.

Схема экспериментальной установки для измерения ОН приведена на рис. 2. Здесь 1 — высоковольтный источник питания, 2 — зарядный коаксиальный кабель с волновым сопротивлением, 3 — стробоскопический осциллограф С1-91/4, 4 — образец ФИИК, 5 — схема запуска ФИИК на основе лавинного транзистора [4], генерирующая импульсы с амплитудой до 110 В с фронтом нарастания 1.5 нс. Значения величин емкости C , нагрузки R_5 и волнового сопротивления кабеля ρ выбирались в зависимости от типа проводимых измерений. Для изучения токовой зависимости ОН $R_5 = 10$ Ом, $C = 470$ пФ, $\rho = 10$ Ом, а длина

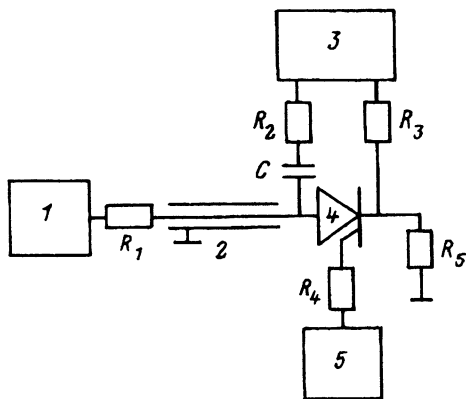


Рис. 2. Схема измерительной установки для измерения остаточного напряжения на ФИИК. Величин сопротивлений, кОм: $R_1 = 100$, $R_2 = R_3 = 1$, $R_4 = 0.4$.

кабеля обеспечивала формирование прямоугольного импульса на нагрузке R_5 длительностью 10 нс. При исследовании временной зависимости ОН $R_5 = 50 \text{ Ом}$, $C = 15 \text{ нФ}$, $\rho = 50 \text{ Ом}$, а длина кабеля обеспечивала формирование прямоугольного импульса на нагрузке R_5 длительностью 300 нс. ОН определялось в случае измерения токовой зависимости по разнице напряжений на двух входах осциллографа через 5 нс после включения ФИИК. В случае измерения временной зависимости фиксировались осциллограммы напряжений на входах осциллографа в течении 400 нс. Временное разрешение измерительной схемы было не хуже 1 нс.

Характерная токовая зависимость ОН для ФИИК в тиристорном и транзисторном режимах приведена на рис. 3. Сильный разброс экспериментальных точек связан с тем, что искомая величина ОН в десятки вольт является разностью напряжений на нагрузке R_5 и на ФИИК, которые имеют порядок величины в сотни вольт. Таким образом, искомая разность двух измеряемых величин близка по своему значению к погрешности измерения этих величин. Сопротивление во включенном состоянии (СВС) у этого образца составило для случая тиристорного включения 1.6 Ом, а для случая транзисторного включения — 2.8 Ом. Величины ОН и СВС пропорциональны общей толщине слабо легированной части структуры и имели величины [при токах $(5 \div 10) \text{ А}$] от 20 В и 0.5 Ом до 60 В и 20 Ом для суммарной толщины $p-i-n$ -слоев 70 и 150 мкм соответственно. Величины ОН и СВС всегда были несколько хуже для транзисторного включения. Характерное соотношение этих величин для транзисторного и тиристорного включений видно из рис. 3. Этот факт объясняется более продолжительным и сложным протеканием тока при транзисторном включении (не только поперек, но и вдоль слоев структуры) и более высоким сопротивлением контакта к слою $N\text{-AlGaAs}$.

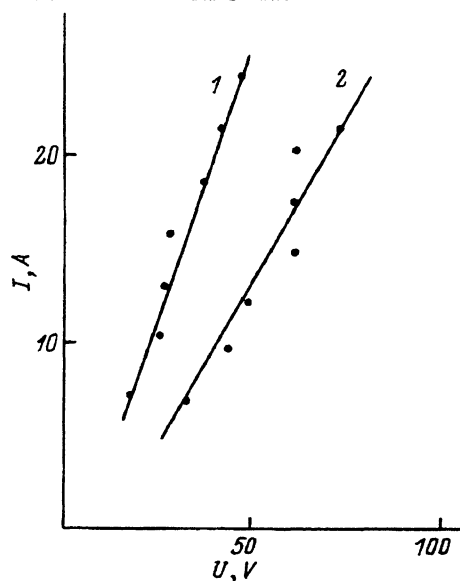


Рис. 3. Токовая зависимость остаточного напряжения на ФИИК для тиристорного (1) и транзисторного (2) включений.

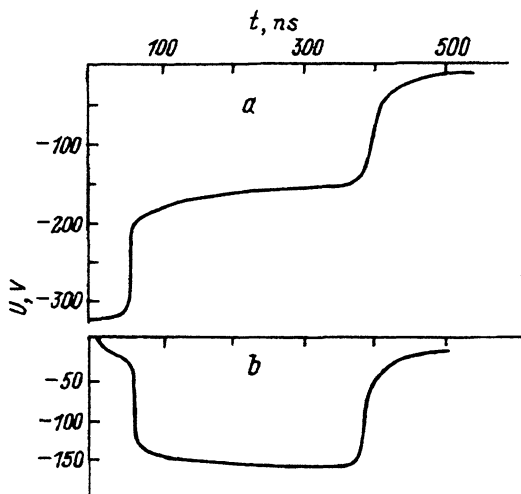


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на ФИИК (a) и на нагрузке R_5 (b).

Типичные осциллограммы напряжений на структуре ФИИК и на нагрузке R_5 в случае тиристорного включения приведены на рис. 4, а и б соответственно. Видно, что ОН плавно уменьшается от величины порядка 50 В до нескольких вольт (эта величина находится на уровне погрешности измерений и точно ее определить не удастся) за время порядка 150 нс. Для образцов с различными геометрическими и электрофизическими параметрами слабо легированных слоев эти времена находились в диапазоне (70–200) нс. Для случая транзисторного включения ФИИК характер данных зависимостей был тот же, но величины ОН были несколько больше.

В «классических» тиристорных структурах такие временные характеристики обычно связывают с распространением включенного состояния по площади приборной структуры в направлении, параллельном плоскости p - n -переходов. Это кажется тем более вероятным, что авторы [5] предполагают «стримерную» модель сверхбыстрого включения GaAs-тиристоров с характерным размером стримерной области включения в единицы микрон. Времена изменения ОН и геометрические размеры наших структур (диаметр светодиода, а следовательно, и диаметр возможной площади включения был равен 300 мкм) хорошо согласуются со скоростями распространения включенного состояния в GaAs-тиристорах (200–1000 мкм/мкс по результатам работы [3]).

Однако наблюдаемая для ФИИК высокая стабильность включения [6] делает стримерную модель сверхбыстрого включения весьма сомнительной, а достигнутая предельная плотность тока порядка $2 \cdot 10^5$ А/см² в расчете на полную площадь структуры вообще подвергает серьезным сомнениям какие-либо предположения о шнуровании тока в ФИИК при площадях структуры порядка 10^{-3} см².

На наш взгляд, непосредственно после субнаносекундного включения ФИИК оказываются промодулированными неосновными носителями только проводимость n^0 -слоя за счет светодиодной подсветки (рис. 1) и область пространственного заряда благодаря лавинному пробое высоковольтного перехода [1,6] или какому-либо другому механизму, природа которого остается до конца не выясненной. Слой p^0 -типа проводимости и та часть i -слоя, которая не занята областью пространственного заряда, имеют низкую проводимость, обеспечиваемую основными носителями. За времена задержки включения (5–20 нс) инжектированные из n^+ -подложки электроны не успевают продиффундировать в эти слои на значительные расстояния и существенным образом поменять их проводимость. Низкая проводимость этих слоев и определяет значительные падения напряжения на ФИИК непосредственно после включения (рис. 4). За времена порядка (100÷200) нс неосновные носители успевают существенным образом промодулировать проводимость i - и p^0 -слоев. Таким образом происходит переход к «классическому» одномерному тиристорному включению.

Для проверки этого предположения была создана тестовая структура, в которой вместо n^+ -подложки использовалась p^+ -подложка (рис. 1). Следовательно, инжекция неосновных носителей в p^0 -слой в данной структуре отсутствовала. Данный прибор имел похожие на обычные для ФИИК характеристики включения, но изменение падения ОН на нем по крайней мере в течение 300 нс отсутствовало.

Полученные результаты свидетельствуют о следующем.

1. Падение напряжения на ФИИК непосредственно после субнано-секундного включения локализовано в p° -слое и части i -слоя, не занятой областью пространственного заряда. Проводимость этих слоев не успевает модулироваться неосновными носителями на этапе задержки включения. Уменьшение ОН путем изменения электрофизических и геометрических параметров i - и p° -слоев при сохранении остальных приборных характеристик неизменными на данном этапе развития технологии производства ФИИК не представляется возможным.

2. Остаточное напряжение на ФИИК уменьшается до величин в единицы вольт за счет сравнительно медленного (в сотни наносекунд) диффузионно-дрейфового переноса неосновных носителей заряда, инжектированных n^{+} -подложкой.

3. Эффект включения ФИИК по крайней мере с площадями до 10^{-3} см² не носит локального характера.

4. При использовании ФИИК в схемах с низкоомной нагрузкой с целью получения на ней импульсов тока большой амплитуды целесообразнее использовать тиристорное включение ФИИК. В данном случае ФИИК обладает меньшими ОН и СВС, хотя это и налагает дополнительные требования на устойчивость $N-p-P$ -гетеросветодиода к повышенным плотностям тока.

Список литературы

- [1] К.И. Алферов, В.М. Ефанов, Ю.М. Задиранов, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.И. Корольков, С.И. Пономарев, А.В. Рожков. Письма ЖТФ, **12**, 1281 (1986).
- [2] В.И. Корольков, Н.Ю. Орлов, А.В. Рожков, А.М. Султанов, М.А. Голов. ПТЭ, № 3, 121 (1993).
- [3] С.Н. Вайнштейн, И.И. Диакону, Ю.В. Жилаев, М.Е. Левинштейн. Письма ЖТФ, **9**, 546 (1983).
- [4] D.J. Hamilton, J.F. Gibbons, W. Shockley. Proc. IRE, **47**, 1102 (1959).
- [5] С.Н. Вайнштейн, Ю.В. Жилаев, М.Е. Левинштейн. ФТП, **22**, 1134 (1988).
- [6] В.И. Корольков, А.С. Прохоренко, А.В. Рожков, А.М. Султанов. ЖТФ, **18**, 26 (1992).

Редактор Т.А. Полянская

Current and time dependence of the residual voltage of the photon-injection pulse switches

V.I.Korol'kov, N.Yu.Orlov, A.V.Rozhkov, F.Yu.Soldatenkov, M.N.Stepanova

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021, St.Petersburg, Russia

A performance of the high voltage photon-injection pulse switches (PIPS) based on a GaAs/AlGaAs heterostructure in switch-on state was studied. It is shown that the residual voltage (RV) across PIPS directly after a subnanosecond switch-on localized in the p° -layer and in the part of the i -layer without the space charge region. Conductivity of these layers does not have time to be modulated by minority carriers during the switch-on delay. The RV directly after the PIPS switch-on is in the range 20–60 V. The RV across the PIPS drops to the value of some volts due to a comparatively slow (about hundreds of nanoseconds) drift-diffusion motion of minority charge carriers injected by n^{+} -substrate.