

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ТОНКОБАЗОВЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ

А. В. Каримов, Д. М. Ёдгорова, О. А. Абдулхаев
Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце»
Ташкент

Поступила в редакцию 16.07.2015

Экспериментально показано, что германиевые p^+np - и кремниевые $n^{++}pnn^+$ -структуры в режиме запирающего перехода со слаболегированной областью выполняют функцию биполярного транзистора с соответствующим рабочим диапазоном и фоточувствительностью. В режиме запирающего перехода с сильнолегированной областью приобретают улучшенные фотодиодные и транзисторные свойства, связанные с динамикой расширения областей объемного заряда и реализацией туннельного и лавинного механизмов пробоя.

Ключевые слова: p^+np -структура; $n^{++}pnn^+$ -структура; туннельный, лавинный пробой; двухбарьерная структура, тонкобазовая структура.

ФІЗИЧНІ ЯВИЩА В ТОНКОБАЗОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУРАХ

А. В. Каримов, Д. М. Ёдгорова, О. А. Абдулхаев

Експериментально доведено, що германієві p^+np - і кремнієві $n^{++}pnn^+$ -структури в режимі замикання переходу зі слаболегованою ділянкою виконують функцію біполярного транзистора з відповідним робочим діапазоном і фоточутливістю. У режимі замикання переходу із сильнолегованою ділянкою набувають поліпшені фотодіодні і транзисторні властивості, пов'язані з динамікою розширення областей об'ємного заряду і реалізацією тунельного та лавинного механізмів пробую.

Ключові слова: p^+np -структура; $n^{++}pnn^+$ -структура; тунельний; лавинний пробій; двобар'єрна структура; тонкобазова структура.

PHYSICAL PHENOMENA THE TRANSISTOR STRUCTURE TONKOBAZOVYH

A. V. Karimov, D. M. Yodgorova, O. A. Abdulhai

It is experimentally shown that the germanium p^+np - and silicon $n^{++}pnn^+$ -structures in blocking mode of the junction with a lightly doped region operate as the bipolar transistor with a corresponding operating range and photosensitivity. In the blocking mode of the junction with a heavily doped region they acquire improved photodiode and transistor properties associated with the expansion dynamics of the space charge regions and development of the tunnel and avalanche breakdown mechanisms.

Keywords: p^+np -structure; $n^{++}pnn^+$ -structure; tunneling, avalanche breakdown; double-barrier structure, thin base.

ВВЕДЕНИЕ

Трехслойную полупроводниковую структуру с чередующимися типами проводимости слоев и с (навстречу или обратно включенными) двумя p - n -переходами в зависимости от схемы включения можно рассматривать как транзистор – усилитель или диод - выпрямитель. Соответственно его диапазон рабочих напряжений также зависит от режима включения, так как концентрации носителей в слоях заметно отличаются друг от друга. В режиме запирающего перехода со слаболегированными областями и прямого

смещения перехода с сильнолегированной областью двухбарьерная структура выполняет функцию биполярного транзистора, к базовой области которого, подавая управляющий ток, создают рабочую точку [1]. При включении с плавающей базой освещаемой полезным световым излучением он становится фототранзистором [2]. Для стабилизации его параметров базовую область блокируют резистором или диодом [3].

В случае, когда относительно напряжения питания переход с сильнолегированной областью (эмиттер) включен в режиме запирающего

двухбарьерная структура становится аналогом диода. Такой режим включения является нежелательным и остается практически неизученным. Как показали исследования модифицированных двух- трехбарьерных диодных структур, внешний воздействующий фактор (свет, температура, давление) выполняет функцию управляющего электрода. Задавая параметры соответствующих областей многослойных структур на основе кремния и арсенида галлия, созданы многобарьерные фоточувствительные структуры: инжекционно-полевые фотодиоды [4], диодно-транзисторные структуры [5], двухбазовые фотодиоды [6], трехбарьерные фотодиоды [7].

Настоящая работа посвящена изучению функциональных возможностей двухбарьерной транзисторной структуры с тонкой базовой областью в режиме запирания (эмиттерного) перехода с сильнолегированной областью. Исследования проведены на основе германиевой p^+np -структуры и кремниевой n^+pnp^+ -структуры.

ГЕРМАНИЕВАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ p^+np -СТРУКТУРА

Исследуемый германиевый транзистор имеет p^+np -структуру, где диффузией сурьмы получена базовая область n -типа толщиной 1 мкм и площадью 1 мм², образующая коллекторный переход. На части ее поверхности сплавлением индия, создающего диффузионный слой p^+ -типа, сформирована сильнолегированная эмиттерная область толщиной 0,5 мкм.

В схеме с общим эмиттером, когда напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном — обратное, имеем типичную выходную характеристику зависимости тока коллектора I_K от напряжения коллектор-эмиттер — $U_{КЭ}$ при постоянном токе базы равном нулю. Как приведено на рис. 1 рабочий ток от напряжения вплоть до 3,5 В имеет низкие значения. Затем экспоненциально увеличивается до 4,7 В и далее переходит на участок пробоя.

В случае запирания отдельно взятого p^+n -перехода эмиттер-база, (рис. 2, кривая 1) до напряжения 4 В имеем минимальные токи с дальнейшим его линейным увеличением с дифференциальным сопротивлением 67 Ом,

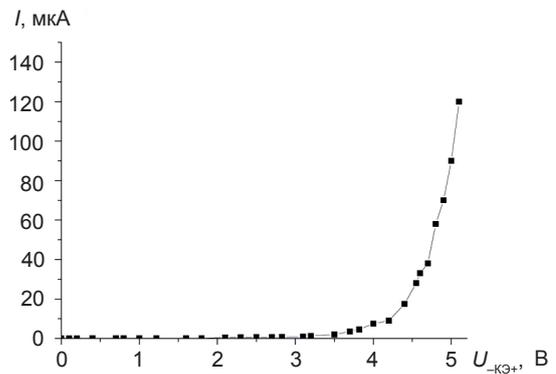


Рис. 1. Зависимости тока германиевого транзистора в режиме запирания коллекторного перехода

что связано с последовательным обеднением n -области. Увеличение температуры от комнатной (20) до 50 °С приводит к уменьшению напряжения пробоя, что обусловлено с туннельным механизмом пробоя.

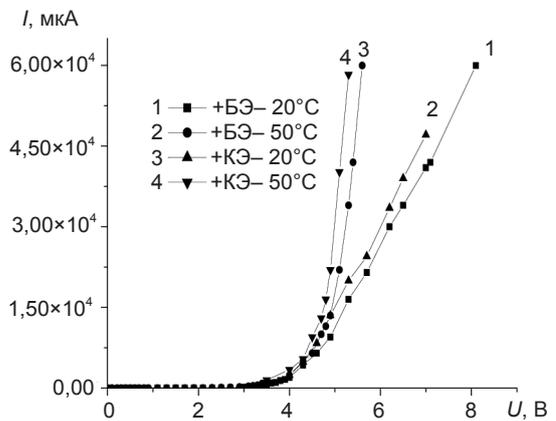


Рис. 2. Зависимости протекающего тока от напряжения в p^+n-p -структуре при различных включениях

В «диодном» режиме (рис. 2, кривые 3, 4), когда эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный переход смещен в прямом направлении при напряжениях свыше 4,9 В наблюдается резкий рост тока с низким дифференциальным сопротивлением (15 Ом). В обоих случаях увеличение температуры от комнатной (20) до 50 °С приводит к уменьшению напряжения пробоя, что обусловлено с туннельным механизмом пробоя.

Наблюдаемый резкий рост тока можно объяснить сужением прямосмещаемого $n-p$ -перехода и увеличением концентрации дырок в эмиттерной p^+ -области при одновременном расширении области объемного заряда запираемого p^+n -перехода вплоть до наступления режима смыкания (перекрытия

областей объемного заряда обоих переходов) (рис. 3). При этом падение напряжения на n - p -переходе линейно увеличивается с увеличением протекающего тока, придавая функцию стабилизатора напряжения (рис. 4).

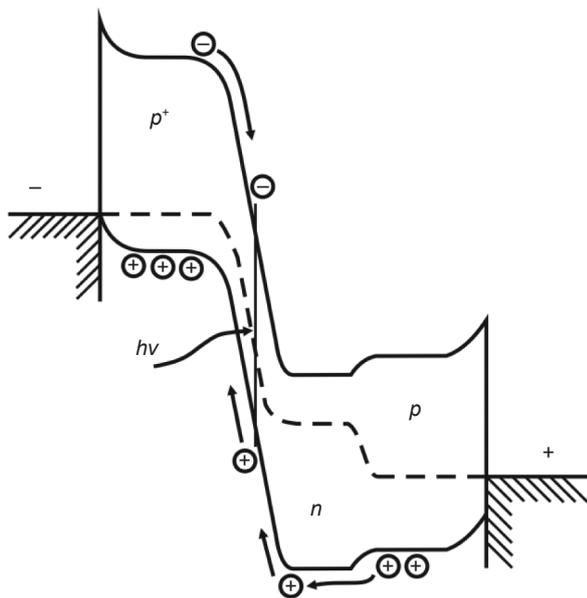


Рис. 3. Зонная энергетическая диаграмма p^+n - p -структуры в режиме запирания p^+n -перехода

Следует отметить, что в данном режиме включения при подсветке базовой области p^+np -структуры получена в 17 раз большая фоточувствительность, чем в германиевом фототранзисторе ФТГ-5 [8].

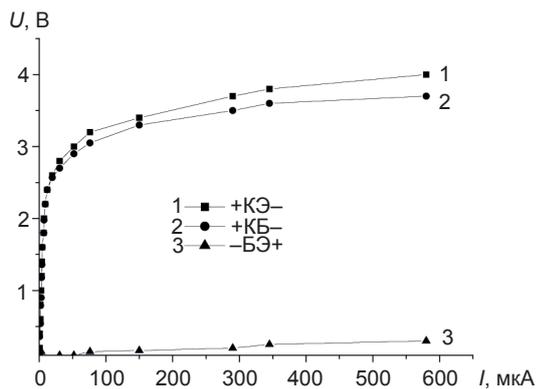


Рис. 4. Зависимости падающих напряжений от рабочего тока n^+pnn^+ -структуры в режиме запирания эмиттера

КРЕМНИЕВАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ n^+pnn^+ -СТРУКТУРА

Исследуемый кремниевый транзистор имеет n^+pnn^+ -структуру, где область n^+ -типа представляет собой подложку

кремния на поверхности которой выращен эпитаксиальный слой n -типа с концентрацией носителей $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 6–10 мкм. На поверхность эпитаксиального слоя диффузией бора сформирована базовая область p -типа толщиной 2,0–2,5 мкм с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Затем диффузией фосфора в эту базовую область получена сильнолегированная область эмиттера n^+ -типа с концентрацией носителей $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 1,5 мкм.

В схеме с общим эмиттером в режиме запирания коллекторного перехода и прямом смещении эмиттерного перехода имеем аналогичную вольтамперную характеристику (рис. 5, кривая 1). Как видно из рисунка рабочий ток от напряжения увеличивается близко к линейному.

При смене полярности рабочего напряжения, так сказать в режиме запирания перехода с сильнолегированной областью, имеем диодную характеристику с резким ростом обратного тока (рис. 5, кривая 2). В данном режиме включения с повышением температуры напряжения пробоя увеличиваются, подтверждая лавинный механизм пробоя [9].

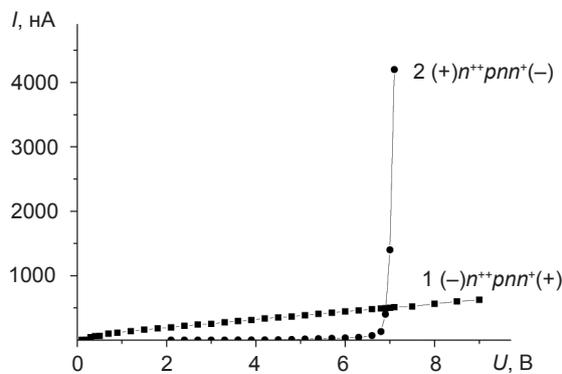


Рис. 5. Вольтамперная характеристика кремниевой n^+pnn^+ -структуры при различных режимах включения

В данном режиме включения подсветка базовой области приводит к генерации фототока с самого начального участка, как и в фототранзисторе. А в предпробойном участке приобретает свойства лавинного фототранзистора [10]. Как видно из зонной диаграммы (рис. 6) по мере увеличения рабочего напряжения область объемного заряда расширяется в направлении базовой области. При этом увеличивается напряженность

электрического поля и область разделения фотогенерированных носителей.

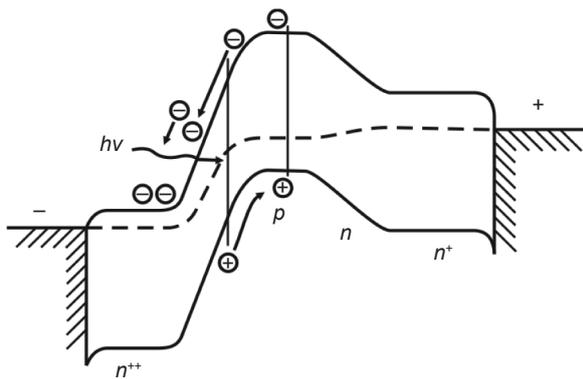


Рис. 6. Зонная энергетическая диаграмма $n^{++}pnn^{+}$ -структуры в режиме запирания n^{+} - p -перехода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Германиевые $p^{+}np$ - и кремниевые $n^{++}pnn^{+}$ -структуры в режиме запирания перехода со слаболегированной областью выполняют функцию биполярного транзистора, обладая свойственным им рабочим диапазоном и фоточувствительностью. В режиме запирания перехода с сильнолегированной областью приобретают улучшенные фотодиодные и транзисторные свойства, связанные с динамикой расширения областей объемного заряда возможно вплоть до смыкания прямо и обратно смещенных переходов с реализацией туннельного и лавинного механизмов пробоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов В. Многофункциональный датчик для электронных систем сбора данных // Электроника. Наука, Технология. Бизнес. — 2006. — № 5. — С. 96–101.
2. Шинкаренко В. Г. Фототранзистор. Сигнальные и пороговые характеристики // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2009. — Т. 14, № 7. — С. 40–64.
3. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. — Москва: Энергия, 1977. — С. 142–143.
4. Патент РУз № IAP 03974. Инжекционно полевой фотодиод / Ёдгорова Д. М., Каримов А. В., Ашрапов Ф. М., Эргашев Ж. А., Якубов А. А. // Бюлл. — 2009. — № 7.
5. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A., Nazarov J. T. The microduty bipolar phototransistor on the base of gallium

- arsenic n - p - m -structure // Physics Express. — 2011. — Vol. 1, No. 3. — P. 191–198.
6. Патент РУз № IAP 04244 «Многофункциональный полупроводниковый прибор» авторов Ёдгоровой Д. М., Каримова А. В., Саидовой Р. А., Гиясовой Ф. А., Бузрукова У. М., Якубова А. А. // Бюлл. — 2010. — № 8.
7. Karimov A. V., Yodgorova D. M. and Abdulkhaev O. A. Physical principles of photocurrent generation in Multi-Barrier Punch-Through-Structures // Second chapter of book «Photodiodes — World Activities in 2011» edited by Jeong-Woo Park. — In Tech, 2011. — P. 23–36.
8. Варгян С. П. Оптоэлектронные приборы и устройства в полиграфии <http://hi-edu.ru/e-books/xbook138/01/part-003.htm>
9. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Абдулхаев О. А., Гиясова Ф. А. Многобарьерные фоточувствительные структуры. «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Республиканская конференция посвященная 100-летию академика С. А. Азимова // Сборник обзорных научных статей. — Ташкент, 2014. — С.144–157.
10. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы вчера, сегодня и завтра // Компоненты и технологии. — 2010. — № 8. — С. 49–58.

LITERATURA

1. Gromov V. Mnogofunkcional'nyj datchik dlya elektronnyh sistem sbora dannyh // Elektronika. Nauka, Tehnologiya. Biznes. — 2006. — No. 5. — P. 96–101.
2. Shinkarenko V. G. Fototranzistor. Signal'nye i porogovye harakteristiki // Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. — 2009. — Vol. 14, No. 7. — P. 40–64.
3. Stepanenko I. P. Osnovy teorii tranzistorov i tranzistornyh shem. — Moskva: Energiya, 1977. — P. 142–143.
4. Patent RUz № IAP 03974. Inzhekcionno polevoj fotodiod / Edgorova D. M., Karimov A. V., Ashrapov F. M., Ergashev Zh. A., Yakubov A. A. // Byull. — 2009. — No. 7.
5. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A., Nazarov J. T. The microduty bipolar phototransistor on the base of gallium arsenic n - p - m -structure // Physics Express. — 2011. — Vol. 1, No. 3. — P. 191–198.
6. Patent RUz No. IAP 04244 «Mnogofunkcional'nyj poluprovodnikovyj pribor» avtorov

- Edgorovoj D. M., Karimova A. V., Saidovoj R. A., Giyasovoj F. A., Buzrukova U. M., Yakubova A. A. // Byull. — 2010. — No. 8.
7. Karimov. A. V., Yodgorova D. M. and Abdulkhaev O. A. Physical principles of photocurrent generation in Multi-Barrier Punch-Through-Structures // Second chapter of book «Photodiodes — World Activities in 2011» edited by Jeong-Woo Park. — In Tech, 2011. — P. 23–36.
 8. Vartanyan S. P. Optoelektronnye pribory i ustrojstva v poligrafii <<http://hi-edu.ru/e-books/xbook138/01/part-003.htm>>
 9. Karimov A. V., Edgorova D. M., Abdulkhaev O. A., Giyasova F. A. Mnogobar'ernye fotochuvstvitel'nye struktury. «Fundamental'nye i prikladnyj voprosy fiziki». Respublikanskaya konferenciya posvyaschennaya 100-letiyu akademika S. A. Azimova // Sbornik obzornyh nauchnyh statej. — Tashkent, 2014. — P. 144–157.
 10. D'yakonov V. P. Lavinnye tranzistory vchera, segodnya i zavtra // Komponenty i tehnologii. — 2010. — No. 8. — P. 49–58.