

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

© 2023 г. Ю. К. Альтудов¹, *, Д. С. Гаев¹, А. В. Псху², С. Ш. Рехвиашвили²¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
ул. Чернышевского, 173, Нальчик, 360004 Россия²Институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН,
ул. Шортанова, 89А, Нальчик, 360000 Россия

*E-mail: rsergo@mail.ru

Поступила в редакцию 02.08.2023 г.

После доработки 10.09.2023 г.

Принята к публикации 10.09.2023 г.

Исследованы свойства биполярного n - p - n -транзистора при воздействии на него немодулированно-го некогерентного излучения, создаваемого “белым” светодиодом. Измерены статические и динамические характеристики транзистора при различных интенсивностях воздействия. Показано, что изменение характеристик транзистора при оптическом воздействии обусловлено увеличением времени жизни неравновесных носителей заряда и фотовольтаическим эффектом в p - n -переходах. По указанным причинам происходит возрастание коэффициента усиления, снижение порога переключения и повышение быстродействия транзистора. Полученные результаты применимы как для создания быстродействующих транзисторов, так и интегральных микросхем принципиально нового типа.

Ключевые слова: биполярный транзистор, оптическое излучение, время жизни неравновесных носителей заряда, фотовольтаический эффект, статические и динамические характеристики

DOI: 10.31857/S0544126923600240, **EDN:** CSXYVP

1. ВВЕДЕНИЕ

Для интегральных схем цифровых устройств и микропроцессоров вместе с увеличением плотности компоновки активных элементов важнейшей является задача повышения быстродействия. Все существующие методы повышения быстродействия интегральных схем подразделяются на два типа: конструктивно-технологические и схемотехнические. Конструктивно-технологические методы включают в себя миниатюризацию активных и пассивных компонентов на чипе, уменьшение паразитных емкостей, работу в режимах с высокими значениями плотностей токов базы и коллектора или тока стока, снижение перепадов напряжений между низкими и высокими уровнями в сигналах. Схемотехнические методы позволяют для одной и той же технологической структуры чипа достичь высокоскоростной работы путем реализации тех или иных схемных решений. Здесь можно выделить форсирование динамического режима посредством корректирующих цепей, использование фиксирующих и шунтирующих диодов, нелинейной обратной связи и токовых переключателей.

Повышение быстродействия периферийных цифровых устройств возможно с применением приборов и принципов оптоэлектроники. Хоро-

шо известны следующие оптоэлектронные приборы [1–3]. Фототранзистор и фототиристор представляют собой приборы, в которых вместо управляющих электродов используется освещение полупроводниковых слоев. Фототиристор отличается тем, что источник света – светодиод из GaAs – встроен в единый корпус с кремниевой тиристорной структурой. На практике широко применяются оптроны, которые состоят из излучателя и фотоприемника в едином корпусе. Как правило, в качестве излучателя используется светодиод. Фотоприемниками служат фоторезисторы, фотодиоды, биполярные и полевые фототранзисторы, фототиристоры. Принцип работы приборов оптоэлектроники заключается в гальванической развязке в управляющих цепях с помощью преобразования оптических сигналов в электрические сигналы. Это осуществляется за счет внутреннего фотоэффекта: при освещении полупроводниковой структуры в ней происходит генерация электронно-дырочных пар и тем самым создается управляющий сигнал. По своим функциям оптопары могут заменять трансформаторы. Оптический изолятор на продольном магнитооптическом эффекте может выступать в качестве силового затвора для снижения рассеиваемой мощности. Известны, кроме того, различные тех-

нические решения для оптоэлектронных интегральных схем [4, 5]. Такие интегральные микросхемы, как правило, представляют собой приемники или передатчики оптических сигналов, которые могут использоваться, например, в волоконно-оптических линиях связи.

Общим недостатком оптоэлектронных приборов является их неприменимость в качестве логических элементов для производства интегральных схем цифровых устройств и микропроцессоров с высокой плотностью компоновки. В настоящей статье ищутся новые пути обхода данной проблемы и проводится исследование работы биполярного транзистора при воздействии на него модулированного оптического излучения (*оптической накачки*). Подход предложен и обоснован в [6] для увеличения быстродействия транзисторов и транзисторных интегральных схем. Главное отличие данного подхода от известных технических решений в оптоэлектронике заключается в отсутствии физических и конструктивных ограничений, порождаемых гальванической развязкой в управляющих цепях. Традиционная структура биполярного транзистора с электродом базы сохраняется, но дополняется внешним источником непрерывного оптического излучения. По нашему мнению, принцип оптической накачки имеет многообещающие перспективы применения в интегральной электронике.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовалась кремниевая планарная транзисторная структура *n-p-n*-типа со следующими статическими параметрами: коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером в активном режиме $\beta_F = 60$; напряжение Эрли в активном режиме $V_{AF} = 12$ В. В качестве источника излучения использовался маломощный “белый” SMD-светодиод. Транзисторная структура и светодиод были размещены в едином герметичном корпусе так, чтобы светодиод равномерно освещал поверхность транзисторной структуры. Интенсивность засветки регулировалась путем изменения напряжения на светодиоде. Прибор включался по схеме с общим эмиттером (рис. 1). Были измерены передаточная характеристика по напряжению, выходная вольтамперная характеристика и осциллограммы переменных сигналов (рис. 2–4). Измерены также зависимости коэффициента β_F и фотоэдс холостого хода на переходах транзистора от мощности постоянного электрического сигнала на светодиоде (рис. 5, 6).

С целью установления физического механизма влияния фоновой засветки на параметры биполярной транзисторной структуры проводилось измерение времени жизни неравновесных носителей заряда (НЗ) по затуханию фотопроводимо-

сти. В качестве образца использовался кремний марки КДБ-1, имеющий свойства базы исследованной транзисторной структуры. Результаты измерений представлены на рис. 7.

На всех рисунках зависимости (*a*) и (*b*) были получены соответственно с выключенной и включенной фоновой засветкой.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

На поверхность транзисторной структуры в процессе ее работы от излучателя падает стационарный и непрерывный поток фотонов. В результате в транзисторной структуре происходит постоянная генерация и рекомбинация неравновесных электронно-дырочных пар, увеличиваются токи основных и неосновных НЗ в активных областях. Это влечет за собой уменьшение напряжения открытия ($V_{BE} < 0.6$ В), рост коэффициента β_F , который зависит от эффективности эмиттера, ускорение переноса неосновных НЗ в базе и уменьшение скорости поверхностной рекомбинации. Уменьшение напряжения открытия приводит к уменьшению порогового напряжения схемы (в нашем случае имеется простой инвертор), сужению диапазона переключения между низкими и высокими уровнями сигналов и уменьшению потребляемой мощности. Отметим, что толщина слоя монокристаллического кремния, в котором происходит почти полное поглощение широкополосного электромагнитного излучения, составляет сотни микрометров [7]. Таким образом, можно утверждать, что с помощью внешнего излучателя создается объемная оптическая накачка прибора.

Из рис. 2–5 можно видеть, что действие светодиода приводит к эффективному уменьшению порога переключения, увеличению выходного тока и заметному снижению среднего времени задержки выходного сигнала. Анализ выходных вольтамперных характеристик показывает, что происходит увеличение напряжения Эрли в активном режиме более, чем в два раза. Анализ переходного процесса показывает, что при облучении транзистора происходит уменьшение постоянной времени коллекторной цепи. Путем применения излучателя можно также добиться значительного (более, чем в три раза!) увеличения коэффициента передачи β_F . Здесь в широком диапазоне изменения мощности P имеет место линейная зависимость, приведенная на рис. 5. Подчеркнем, что наклон передаточной характеристики по напряжению и частота единичного усиления схемы на рис. 1 прямо пропорциональны β_F .

В качестве излучателя допустимо использовать маломощный полупроводниковый лазер, что позволит создавать направленное излучение и усилить существующие эффекты. В целом, име-

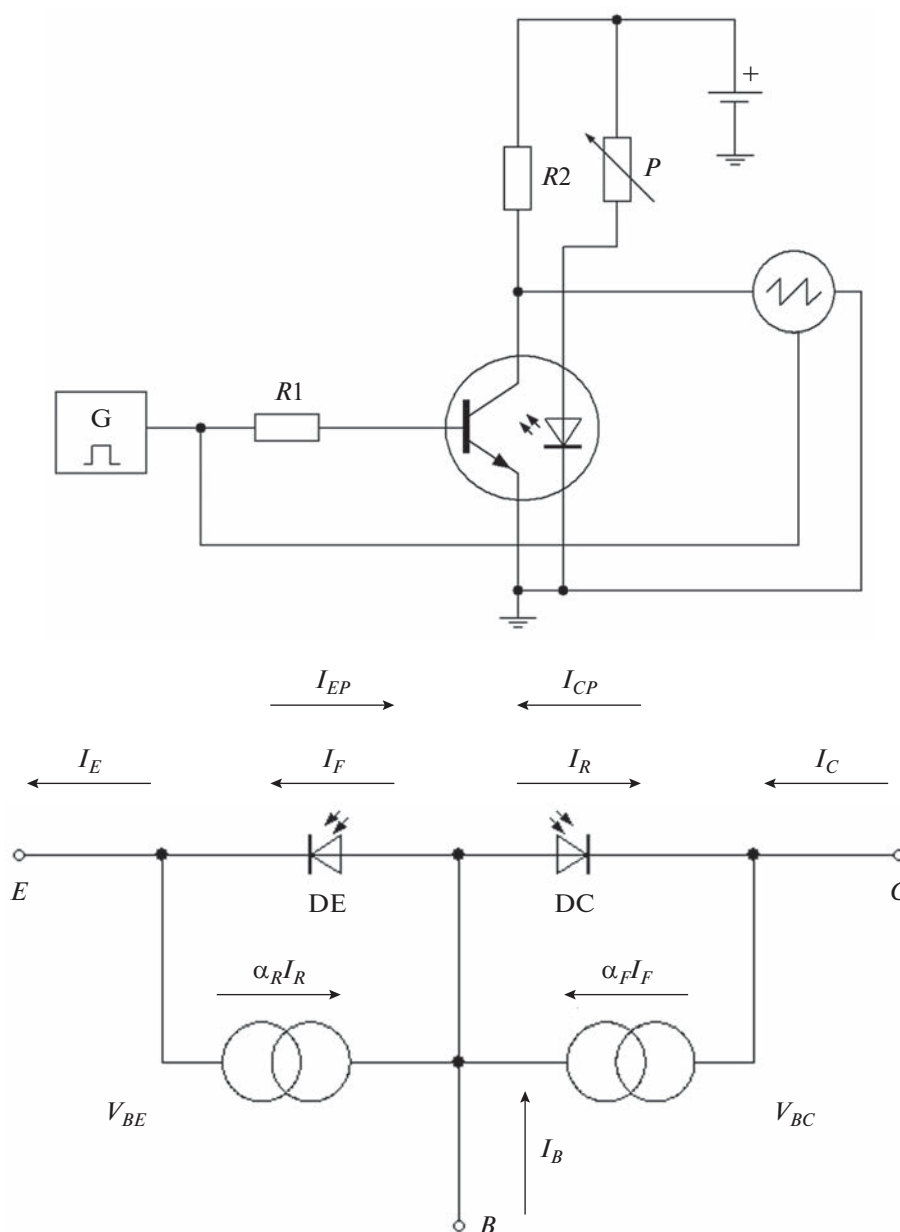


Рис. 1. Схема измерения параметров транзисторной структуры и ее эквивалентная схема.

ются достаточные основания полагать, что оптимизация конструкции полупроводниковых приборов и интегральных схем с использованием рассматриваемого способа может приводить к улучшению их статических и динамических характеристик.

Рассуждая на качественном уровне, нужно иметь в виду, что эффективность эмиттера и перенос НЗ в базе n - p - n -транзистора определяются факторами ([8], §7.3): (L_p/W_B) и $(L_n/W_B)^2$, где W_B — ширина квазинейтральной области базы, L_n и L_p — диффузионные длины электронов в базе

и дырок в эмиттере транзистора. Отсюда следует, что увеличение коэффициента β_F должно быть непосредственно связано с увеличением диффузионных длин и времен жизни неосновных НЗ при облучении. Дополнительные эксперименты по релаксации фотопроводимости надежно подтверждают этот вывод и показывают (рис. 7), что в образце при его немодулированной некогерентной засветке происходит увеличение времени жизни НЗ более, чем на 50%. Уменьшение амплитуды сигнала фотопроводимости при действии фоновой засветки вызвано, по всей вероятности, снижением концентрации импульсно генерируе-

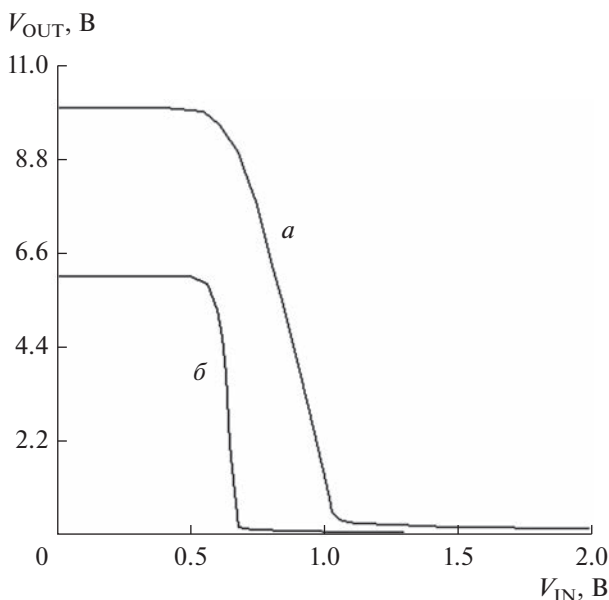


Рис. 2. Передаточные характеристики схемы по напряжению.

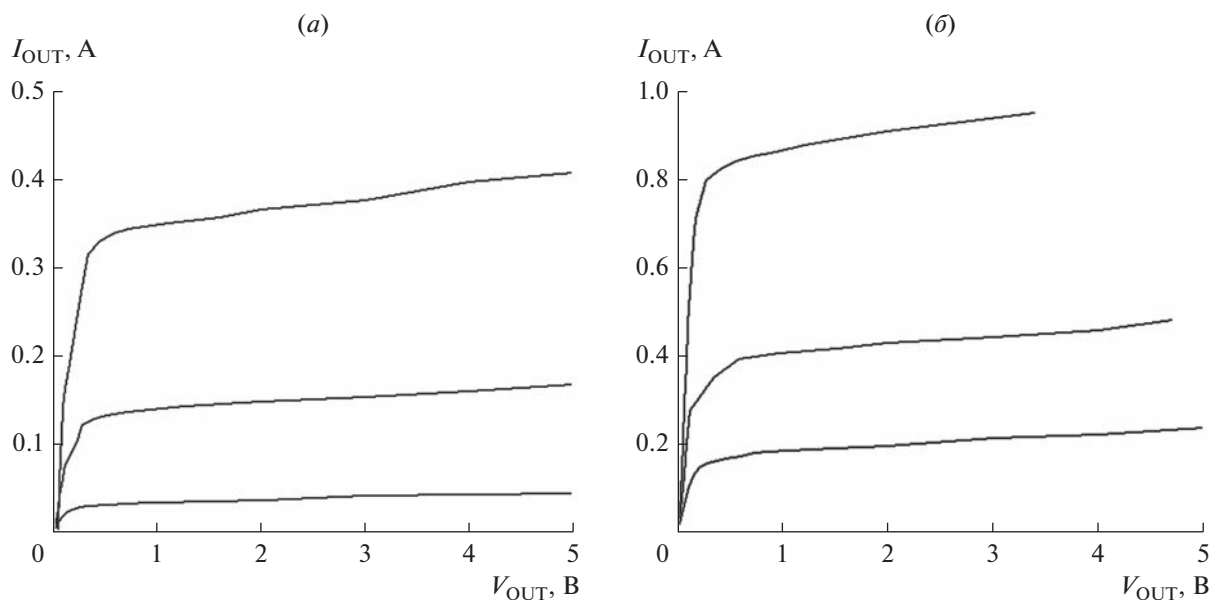


Рис. 3. Выходные вольтамперные характеристики схемы.

мых НЗ. Похожие результаты были получены в работах [9, 10] при измерении СВЧ-проводимости в кремнии и объяснялись авторами образованием экситонов. В работах [11, 12] было указано на влияние в близких физических условиях поверхностной рекомбинации, которая должна сказываться на работе транзистора.

Обнаруженное нами изменение статических характеристик свидетельствует не только о возрастании времени жизни НЗ, но и о влиянии фотовольтаического эффекта вблизи p - n -переходов.

Прямое подтверждение этому дают измерения фотоэдс, результаты которых представлены на рис. 6. Уместно добавить отметить, что генерация фототоков наблюдается при импульсном лазерном воздействии на GaAs полевые транзисторы с затвором Шоттки и интегральные усилители на псевдоморфных транзисторах с высокой подвижностью электронов [13]. В связи с этим, а также сообразно парадигме модели Эберса—Молла ([8], §7.2), исследованную транзисторную структуру можно представить в виде двух фотодиодов, включенных навстречу друг другу (рис. 1). В рам-



Рис. 4. Осциллограммы ВЧ-сигналов в схеме: красный — входной сигнал; синий — выходной сигнал.

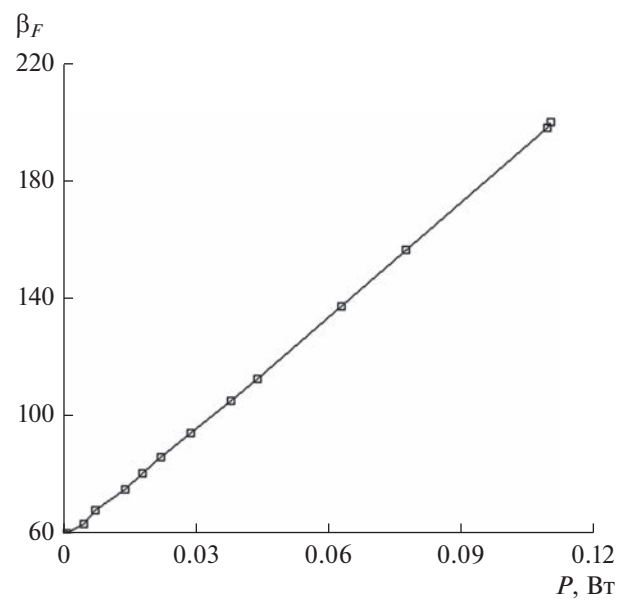


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером от электрической мощности фоновой засветки.

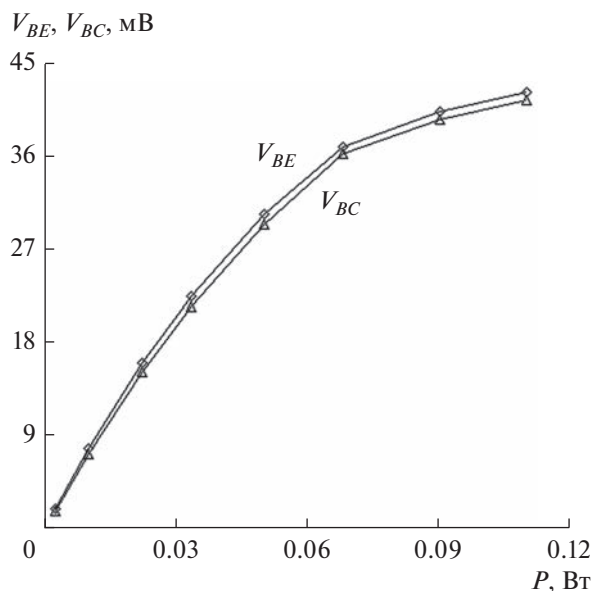


Рис. 6. Зависимости напряжений холостого хода эмиттерного V_{BE} и коллекторного V_{BC} переходов от электрической мощности фоновой засветки.

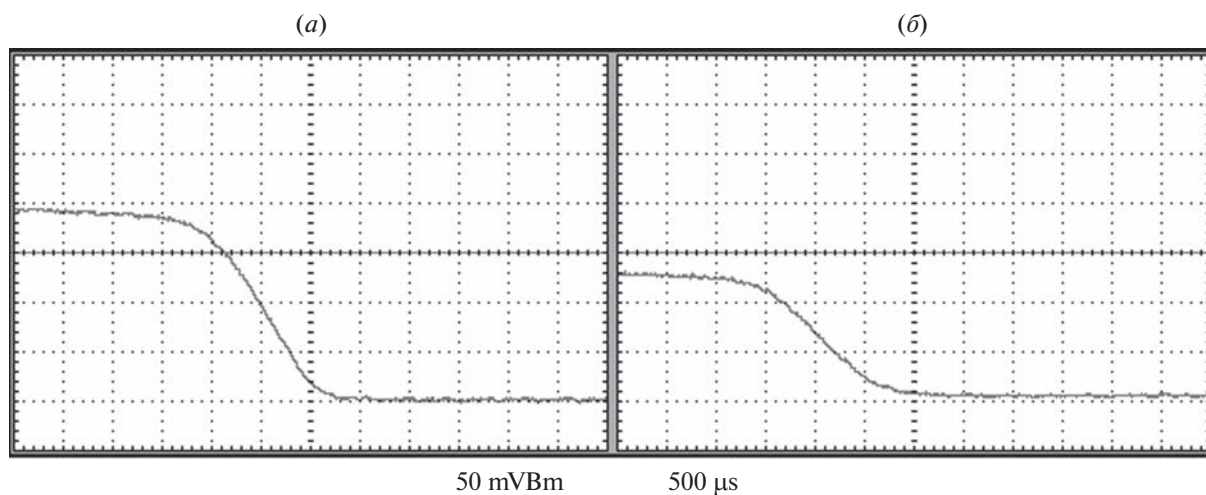


Рис. 7. Осциллограммы сигналов фотопроводимости.

ках такого представления несложно получить выражения для токов эмиттера, коллектора и базы:

$$I_E = I_E^* - \Delta I_E, \quad I_C = I_C^* - \Delta I_C, \quad I_B = I_E - I_C,$$

$$\begin{bmatrix} I_E^* \\ I_C^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ES} & -\alpha_R I_{CS} \\ \alpha_F I_{ES} & -I_{CS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(V_{BE}/V_T) \\ f(V_{BC}/V_T) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_E \\ \Delta I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_R \\ \alpha_F & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{EP} \\ I_{CP} \end{bmatrix},$$

$$f(x) = \exp(x) - 1,$$

где α_F и α_R — коэффициенты передачи токов эмиттера и коллектора в схеме с общей базой в ак-

тивном и инверсном режимах, I_E^* и I_C^* — токи эмиттера и коллектора эквивалентного невозмущенного транзистора с действующими значениями коэффициентов передачи, соответствующими заданному уровню фоновой засветки, I_{EP} и I_{CP} — фототоки эмиттерного и коллекторного переходов, I_{ES} и I_{CS} — темновые токи насыщения эмиттерного и коллекторного переходов, $V_T = kT/q$ — температурный потенциал, равный 26 мВ при температуре 300 К. В данной модели наглядно

разделяются вклады от разных физических процессов — генерация и рекомбинация НЗ описываются через коэффициенты α_F и α_R , приращения токов ΔI_E и ΔI_C учитывают фотовольтаический эффект. Как и в обычном фототранзисторе, индуцированные фототоки I_{EP} и I_{CP} при заданном постоянном уровне засветки могут модулироваться внешними напряжениями на эмиттерном и коллекторном переходах. При $I_{EP} = I_{CP} = 0$ имеем стандартную модель Эберса—Молла.

С нашей точки зрения, помимо предположительного образования экситонов [10], складывается еще и следующая физическая картина. Как известно, в отсутствие равновесия в зоне проводимости и валентной зоне полупроводника может возникнуть такое распределение НЗ, которое будет отвечать вырожденному равновесному полупроводнику n - и p -типа (т.н. двойное вырождение). В нашем случае это реализуется вследствие оптической накачки. В реальных полупроводниковых кристаллах на границах зон плотность состояний никогда не бывает нулевой. Такие несовершенства структуры, как примесные атомы, точечные дефекты и дислокации приводят к образованию мелких уровней и хвостов плотности состояний, которые приблизительно экспоненциально убывают вглубь запрещенной зоны. Образующиеся хвосты, как правило, играют роль ловушек и всегда проявляются в спектрах оптического поглощения. При высоком уровне инжекции сгенерированные электроны и дырки захватываются на уровни хвостов, поэтому их зарядовые состояния изменяются. Согласно теории Шокли—Рида—Холла, времена жизни электронов и дырок обратно пропорциональны концентрациям ловушек и коэффициентам захвата, которые определяются кулоновским притяжением зарядов. Непрерывная засветка, по-видимому, приводит к уменьшению количества активных ловушек вместе с коэффициентами захвата. Это происходит потому, что ловушки при больших концентрациях неравновесных НЗ очень быстро заполняются и уже перестают эффективно взаимодействовать с подвижными НЗ. В итоге времена жизни импульсно сгенерированных электронов и дырок возрастают. Мы не исключаем, что центры рекомбинации, в частности многозарядные центры [14], в условиях непрерывной фотогенерации неравновесных НЗ могут превращаться в квазистационарные центры прилипания ([15], с. 330). Наличие таких центров прилипания также приводит к увеличению времени жизни НЗ ([15], с. 96). Наконец, обратим внимание на еще одно обстоятельство. В легированных полупроводниковых кристаллах захват неосновных НЗ ловушками вызывает увеличение концентрации подвижных основных НЗ (в нашем случае это дырки), что приводит к увеличению фотопроводимости [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена работа планарной транзисторной структуры n - p - n -типа при воздействии на нее постоянного оптического излучения, создаваемого “белым” SMD-светодиодом. Показано, что непрерывная фоновая засветка позволяет повысить быстродействие прибора. Физически это объясняется двумя причинами. Во-первых, при высоких значениях концентраций генерируемых электронов и дырок роль ловушек снижается и диффузионные длины и времена жизни электронов и дырок возрастают. Во-вторых, в p - n -переходах возникает фотовольтаический эффект, который приводит к появлению добавочных токов в транзисторной структуре.

Выявлены следующие недостатки прибора: 1) длительное время релаксации после выключения излучателя; 2) влияние флуктуаций параметров излучателя; 3) возрастание неравновесного фликкер-шума в структуре из-за оптического воздействия [17]. Перечисленные недостатки частично или даже полностью устраняются конструктивно-технологическими приемами и методами.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника. Энциклопедический словарь. Гл. ред. Колесников В.Г. М.: Сов. энциклопедия, 1991. С. 348—351.
2. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. М.: Радио и связь, 1989. 360 с.
3. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. М.: Техносфера, 2004. 592 с.
4. Agrawal G.P., Dutta N.K. Photonic and optoelectronic integrated circuits. In: Semiconductor Lasers. Springer, Boston, MA. 1993. P. 530—546.
5. Zimmermann H. Silicon optoelectronic integrated circuits. Springer International Publishing, 2018. 441 p.
6. Рехвиашвили С.Ш., Нарожнов В.В. Способ повышения быстродействия транзисторов и транзисторных интегральных схем. Патент РФ № 2799113. Приоритет от 18.03.2022.
7. Косяченко Л.А., Грушко Е.В., Микитюк Т.И. Поглощательная способность полупроводников, используемых в производстве солнечных панелей // ФТП. 2012. Т. 46. № 4. С. 482—486. [пер. Kosyachenko L.A., Grushko E.V., Mikityuk T.I. Absorptivity of semiconductors used in the production of solar cell panels // Semiconductors. 2012. V. 46. № 4. P. 466—470.]
8. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы. Материалы, приборы, изготовление. М.: Мир, 1985. 504 с.
9. Бородовский П.А., Булдыгин А.Ф., Токарев А.С. О некоторых эффектах, наблюдаемых при СВЧ-измерениях времени жизни в слитках кремния // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 6. С. 403—408. [пер. Borodovskii P.A., Buldygin A.F., Tokarev A.S. On

- some effects observed in microwave measurements of the lifetime in silicon ingots // Russian Microelectronics. 2006. V. 45. № 6. P. 345–349.]
10. Бородавский П.А., Булдыгин А.Ф., Голод С.В. Аномальная релаксация фотопроводимости в кремнии при высоких уровнях инжекции // ФТП. 2009. Т. 43. № 3. С. 329–331. [пер. Borodovskii P.A., Buldygin A.F., Golod S.V. Anomalous relaxation of photoconductivity in silicon at high excitation levels // Semiconductors. 2009. V. 43. № 3. P. 310–312.]
 11. Кобелева С.П., Юрчук С.Ю., Ярынчак М.А., Калинин В.В. Влияние поверхностной рекомбинации на измерение времени жизни в слитках монокристаллического кремния // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. 2006. № 4. С. 17–20.
 12. Анфимов И.М., Кобелева С.П., Пыльнев А.В., Щемеров И.В., Егоров Д.С., Юрчук С.Ю. К вопросу об определении объемного времени жизни по спаду фотопроводимости на непассивированных образцах монокристаллического кремния // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19. № 3. С. 210–216. [пер. Anfimov I.M., Kobeleva S.P., Pylnev A.V., Schemerov I.V., Egorov D.S., Yurchuk S.Yu. On the problem of determining the bulk lifetime by photoconductivity decay on the unpassivated samples of monocrystalline silicon // Russian Microelectronics. 2017. V. 46. № 8. P. 585–590.]
 13. Пашенцев В.Н. Изменение характеристик полупроводниковых структур СВЧ-усилителей под воздействием импульсного лазерного излучения // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1715–1721. [пер. Pashentsev V.N. Changes in the characteristics of semiconductor structures of microwave amplifiers under the action of pulsed laser radiation // Technical Physics. 2022. V. 67. № 14. P. 2236–2242.]
 14. Евстропов В.В., Киселев К.В., Петрович И.Л., Царенков Б.В. Скорость рекомбинации через многоуровневый (многозарядный) центр // ФТП. 1984. Т. 18. № 5. С. 902–912.
 15. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 558 с.
 16. Fan H.Y. Effect of traps on carrier injection in semiconductors // Phys. Rev. 1953. V. 92. № 6. P. 1424–1428.
 17. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л. Природа объемного шума 1/f в GaAs и Si (обзор) // ФТП. 1991. Т. 25. № 12. С. 2065–2104. [пер. Dyakonova N.V., Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L. Nature of the bulk 1/f noise in GaAs and Si // Sov. Phys. Semicond. 1991. V. 25. № 12. P. 1241–1265.]