

Г. Г. БАБИЧЕВ, к. т. н. Г. И. ГАВРИЛЮК, Э. А. ЗИНЧЕНКО,
д. ф.-м. н. С. И. КОЗЛОВСКИЙ, д. ф.-м. н. В. А. РОМАНОВ,
Н. Н. ШАРАН

Украина, г. Винница, НИИ "Телий"; г. Киев, Институт физики
полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: helium@svitonline.com, mickle@semicond.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
23.03 2004 г.

Оппонент д. т. н. В. С. ОСАДЧУК
(ВНТУ, г. Винница)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ НА ОСНОВЕ ОДНОПЕРЕХОДНЫХ ТЕНЗОТРАНЗИСТОРОВ

Предложена конструкция преобразователя давления для создания устройств с повышенными требованиями к помехозащищенности и точности измерения информативного сигнала.

Тензочувствительные приборы с частотно-модулированным механической деформацией выходным сигналом представляют практический интерес по следующим соображениям: во-первых, эти приборы отличаются повышенной помехозащищенностью ввиду слабой чувствительности частотно-модулированного сигнала к электромагнитным и радиопомехам; во-вторых, частотно-модулированный сигнал удобен для прямого подключения микропроцессорных систем, поскольку не требует аналого-цифрового преобразования.

Статическая вольт-амперная характеристика (S -типа) однопереходного транзистора имеет участок с негативным дифференциальным сопротивлением, что позволяет применять такие структуры в схемах генераторов прямоугольных импульсов, линейно изменяющегося напряжения, граничных устройств и преобразователей. Известно, что схемы на базе однопереходных транзисторов проще и надежнее, чем аналогичные схемы на диодах и биполярных транзисторах, что определяет их перспективу при разработке датчиков физических величин. Так, например, на основе однопереходных транзисторов, чувствительных к магнитному полю, созданы преобразователи с выходным сигналом, частота которого зависит от величины магнитного поля (однопереходные магнитотранзисторы) [1].

В настоящей работе мы рассмотрим принцип действия, топологию и основные характеристики однопереходных тензотранзисторов, на основе которых можно построить преобразователи механических величин с частотным выходом, прежде всего — давления. Тензотранзисторы могут быть изготовлены методами стандартной интегральной технологии и размещены на планарной стороне профилированной кремниевой мембраны с двумя жесткими островками, которая в месте расположения однопереходной тензотранзисторной структуры трансформирует равномерно распределенную по ее поверхности нагрузку в упругую одноосную деформацию растяжения (сжатия) [2].

Принцип действия однопереходных тензотранзисторов основан на возникновении эффекта анизотропии электропроводности (подвижности свободных носителей заряда) в первично изотропном кремнии при направленной упругой деформации. Известно [3], что направленная упругая одноосная деформация снижает симметрию кремниевого кристалла, и исходно изотропные подвижности электронов μ_n и дырок μ_p становятся анизотропными (для определенности — например, в xu -плоскости) с отличными от нуля диагональными компонентами μ_{nxu} , μ_{pxu} . В результате продольный (в x -направлении) дрейф носителей заряда в тянущем электрическом поле E_x может сопровождаться возникновением поперечного (в u -направлении) потока электронно-дырочных пар, величина которого пропорциональна aE_x , где a — параметр анизотропии, равный разнице относительных анизотропий подвижностей электронов и дырок —

$$a = a_n - a_p \equiv \frac{\mu_{nxu}}{\mu_{nyu}} - \frac{\mu_{pxu}}{\mu_{pyu}}. \quad (1)$$

В нашем случае параметр анизотропии пропорционален значению одноосного механического напряжения σ в базе тензотранзистора [2]:

$$a(\sigma) = (\Pi_{44}^n - \Pi_{44}^p)\sigma/2, \quad (2)$$

где Π_{44}^n, Π_{44}^p — сдвиговые пьезорезистивные коэффициенты в кристаллах кремния n - и p -типов, соответственно.

Следует отметить, что принцип работы исследуемых однопереходных тензотранзисторов формально эквивалентен принципу работы аналогичных магнитотранзисторов, чувствительных к поперечному магнитному полю [1].

Простой однопереходный тензотранзистор (или двухбазовый диод) суть полупроводниковый прибор с одним p - n -переходом и двумя базовыми контактами. Статическая вольт-амперная характеристика (VAX) S -типа имеет две характерные точки — напряжений включения (пика) U_p и выключения U_v (впадины), которые обозначают участок VAX с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Введем параметры чувствительности однопереходного тензотранзистора — относительные тензочувствительности по напряжениям включения S_{Rp} и выключения — S_{Rv} , определив их следующим образом:

$$S_{Rp(Rv)} = \frac{1}{U_{p(v)}} \left| \frac{\partial U_{p(v)}}{\partial \sigma} \right|_{\sigma \rightarrow 0} \quad (3)$$

Здесь $\sigma \rightarrow 0$ означает, что указанные параметры определяются при малых значениях σ .

Без механической деформации однопереходный тензотранзистор работает как обычный однопереходный транзистор. При наличии разницы потенциалов между базовыми контактами B_1 и B_2 и в отсутствие такой разницы между эмиттером E и базовым контактом B_2 (см. **рис. 1**) малый обратный ток насыщения течет через $p-n$ -переход E . По мере заряда конденсатора C отрицательная разность потенциалов между эмиттером и базовым контактом B_2 растет, $p-n$ -переход смещается в прямом направлении и инжектирует неравновесные носители заряда (электроны), которые дрейфуют в направлении базового электрода B_2 . Сопротивление участка базы между эмиттером и базовым электродом B_2 уменьшается, что приводит к еще большему росту напряжения смещения перехода в прямом направлении. Этот процесс имеет лавинный характер и заканчивается переходом тензотранзистора в открытое состояние.

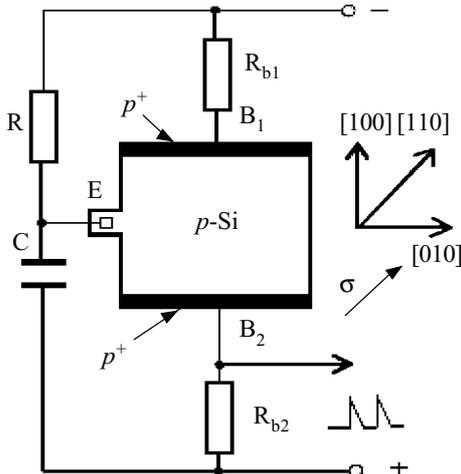


Рис. 1. Схема мультивибратора на основе однопереходного тензотранзистора

В условиях механической нагрузки кремниевой мембраны в базе тензотранзистора возникает анизотропия подвижности основных носителей заряда (дырок).

В низкопроводном состоянии, когда эмиттерный $p-n$ -переход закрыт, дрейф дырок в продольном тянущем электрическом поле сопровождается их отклонением в поперечном направлении и образованием поперечной разности потенциалов. Наведенная таким образом поперечная разность потенциалов устраняет поперечное отклонение основных носителей заряда и, в соответствии со знаком и величиной упругой деформации, модулирует уровень инжекции эмиттера и значение напряжения включения тензотранзистора. По аналогии с магнитотранзисторами [4], возникновение поперечной разности потенциалов под влиянием продольного электрического поля в полупроводниках с анизотропной электропроводностью будем называть *эффектом модуляции инжекции*.

В высокопроводящем состоянии, когда эмиттер инжектирует неравновесные носители заряда, поперечная разность потенциалов уменьшается за счет роста

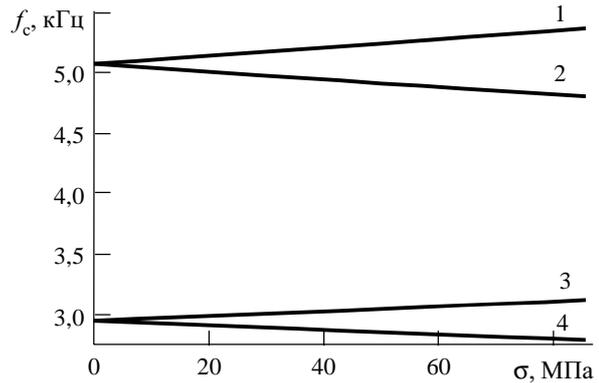


Рис. 2. Зависимость частоты выходного сигнала мультивибратора от уровня механического напряжения сжатия (1, 3) и растяжения (2, 4) в базе тензотранзистора: 1, 2 — $U_{bb}=6$ В; 3, 4 — $U_{bb}=4$ В

электропроводности базы и перестает влиять на режим работы однопереходного тензотранзистора. Основным эффектом, который влияет на работу тензотранзистора, выступает *эффект отклонения*, когда при наведении анизотропии электропроводности поток неравновесных электронно-дырочных пар отклоняется к ближней или дальней (по отношению к эмиттеру) боковой поверхности базовой области. Вызванное деформацией отклонение модулирует электропроводность базы и, следовательно, значение напряжения отключения тензотранзистора.

Проведенные вычисления [5] дают следующие значения относительных чувствительностей (Па^{-1}):

$$S_{Rp} \approx 4 \cdot 10^{-10}, \quad S_{Rv} \geq 10^{-10}.$$

На рис. 1 показана схема мультивибратора на основе однопереходного тензотранзистора, частота которого зависит от уровня механических напряжений области базы. В установившемся режиме период колебаний мультивибратора равен

$$T(\sigma) = RC \ln \left[\frac{U_v - U_0}{U_p(\sigma) - U_0} \right], \quad (4)$$

где R — сопротивление внешнего резистора;
 C — емкость внешнего конденсатора;
 U_0 — напряжение питания.

Зависимость частоты колебаний выходного сигнала f_c такого мультивибратора от уровня механического напряжения в базе тензотранзистора при двух значениях разности потенциалов между базовыми контактами U_{bb} изображена на **рис. 2**.

Однопереходный тензотранзистор с управляющим $p-n$ -переходом отличается от обычного однопереходного транзистора наличием дополнительного управляющего $p-n$ -перехода. Подобно обычному, он имеет высокий импеданс в закрытом состоянии и низкий — в открытом. Переключение происходит при модуляции электропроводности базы транзистора управляющим $p-n$ -переходом.

Управляющий однопереходный транзистор можно рассматривать как интеграцию в рамках одного полупроводникового прибора обычного однопереходного и биполярного транзисторов. Такая комбинация широко применяется в электронике для создания

аналого-импульсных преобразователей “напряжение—частота” или “напряжение—временной интервал”. Тогда преобразователь состоит из мультивибратора в автоколебательном режиме и управляющей электронной цепочки, определяющей частоту колебаний. Чувствительность управляющей цепочки к внешним направленным возбуждениям (например, магнитное поле, температура, упругая деформация) определяет перспективность управляющего однопереходного транзистора при разработке преобразователей физических величин с частотным выходом.

Рассмотрим принцип действия тензотранзистора в отсутствие деформации.

При подаче напряжения питания конденсатор C заряжается от источника ηU_{bb} (η — коэффициент передачи напряжения, или внутренний коэффициент распределения) через сопротивление обратносмещенного $p-n$ -перехода E_1 . Постоянная времени заряда конденсатора равна $\tau_C \cong CR_{ee}$, где R_{ee} — сопротивление участка базы между $p-n$ -переходами E_1 и E_2 . При достижении напряжения на конденсаторе U_C уровня напряжения включения однопереходного транзистора ($B_1-E_1-B_2$) $U_C=U_p$ транзистор открывается, и конденсатор разряжается через сопротивление участка базы (E_1-B_2) и сопротивление нагрузки R_b , формируя на нем импульс напряжения. По мере разряда конденсатора напряжение на нем падает и при условии $U_c < U_v$ однопереходный транзистор отключается. Далее эти процессы повторяются.

Легко видеть, что частота импульсов определяется сопротивлением участка базы между $p-n$ -переходами E_1 и E_2 , который в схеме мультивибратора на рис. 1 соответствует сопротивлению R . Как будет показано ниже, сопротивление участка базы между $p-n$ -переходами E_1 и E_2 может изменяться в широких пределах механической деформацией базы в результате возникновения эффекта отклонения.

Действие равномерно распределенной механической нагрузки на кремниевую мембрану вызывает в базе однопереходного тензотранзистора анизотропию электропроводности. Наведенная деформацией анизотропия электропроводности ведет к образованию поперечного (по отношению к направлению продольного тянущего поля) потока электронно-дырочных пар. Поперечное отклонение электронно-дырочных

пар, которые инжектированы эмиттером E_1 , может существенно модулировать постоянную заряда конденсатора. Например, при отклонении неравновесных носителей заряда в направлении эмиттера E_1 его ток растет, постоянная времени заряда конденсатора уменьшается и, следовательно, растет частота импульсов. При отклонении носителей заряда в противоположном направлении уменьшается и величина тока $p-n$ -перехода E_1 , и частота выходных импульсов. При допущении $\frac{U_v}{\eta U_{bb}}, \frac{U_p}{\eta U_{bb}} \ll 1$ выражение для частоты выходного сигнала имеет вид [6]

$$f(\sigma) \cong \frac{I_{e2}\beta(\sigma)}{C[U_p(\sigma) - U_v(\sigma)]}, \quad (5)$$

где $\beta(\sigma)$ — коэффициент переноса составного биполярного транзистора E_2-B-E_1 , равный отношению компонент тока дырок, дошедших к $p-n$ -переходу E_1 и инжектированных эмиттером E_2 .

Для характеристики преобразователя на основе управляемого однопереходного тензотранзистора введем параметр “крутизна преобразования S_f ”, определив его следующим образом:

$$S_f = \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma \rightarrow 0}. \quad (6)$$

Выражение для крутизны преобразования может быть записано в виде

$$S_f = S_{f\beta} + S_{fv} + S_{fp}, \quad (7)$$

где $S_{f\beta}, S_{fv}, S_{fp}$ — крутизна преобразования, обусловленная деформационной переменной коэффициента переноса и значений напряжения включения и отключения тензотранзистора, соответственно.

Расчет распределения концентрации неравновесных носителей заряда в базе тензотранзистора [6] и — на его основе — параметров однопереходного тензотранзистора с управляющим $p-n$ -переходом дает следующие значения крутизны преобразований (Па^{-1}):

$$S_{f\beta} \cong 1,5 \cdot 10^{-8}, \quad S_{fv} \cong (5 \dots 3) \cdot 10^{-10}, \quad S_{fp} \cong 10^{-9}.$$

Зависимость частоты выходного сигнала преобразователя, представленного схемой на рис. 3, от величины механического напряжения в базе тензотранзистора, показана на рис. 4.

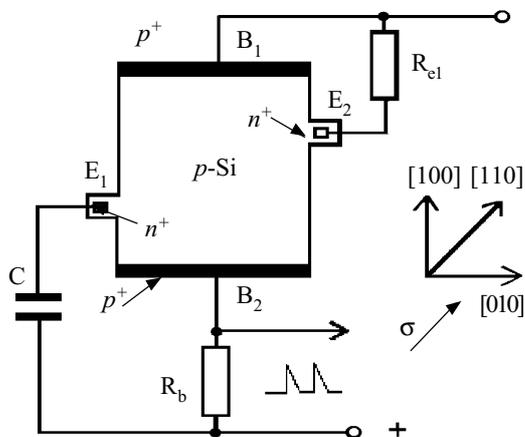


Рис. 3. Схема включения и кристаллографическая ориентация однопереходного тензотранзистора с управляющим $p-n$ -переходом

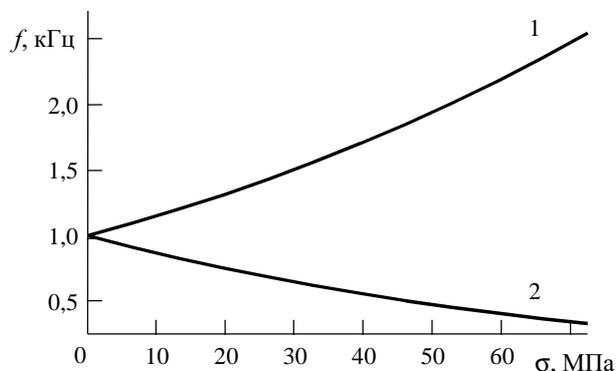


Рис. 4. Зависимость частоты преобразователя давления на основе управляющего однопереходного тензотранзистора (рис. 3):

1 — механическое напряжение сжатия в базе тензотранзистора; 2 — напряжение растяжения

Выводы

Упругая деформация базы простого однопереходного тензотранзистора может изменять значения напряжений переключения благодаря эффектам модуляции инжекции и отклонения, соответственно.

Основным определителем тензочувствительности однопереходного тензотранзистора с управляющим $p-n$ -переходом является эффект отклонения и обусловленная им деформационная зависимость коэффициента переноса составного биполярного транзистора. Тензочувствительность однопереходного тензотранзистора с управляющим $p-n$ -переходом более чем на порядок выше аналогичной характеристики простого однопереходного тензотранзистора.

Предложенный преобразователь давления с частотным выходом представляет практический интерес с точки зрения высокой чувствительности, возможности работы в условиях повышенного уровня электромагнитных помех и относительно низкой стоимости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы.— М.: Радио и связь, 1983.
2. Бойко И. И., Жадько И. П., Козловский С. И., Романов В. А. Оптимизация параметров чувствительного элемента на основе поперечной тензоэдс в кремниевых преобразователях давления // В сб.: Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— Киев: Наукова думка, 1993.— Вып. 27.— С. 94—98.
3. Бойко И. И., Романов В. А. Электрические и фотоэлектрические свойства полупроводников с анизотропной электропроводностью // ФТП.— 1977.— Т. 11, № 5.— С. 817—835.
4. Baltes H. P., Popovic R. S. Integrated semiconductor magnetic field sensors // Proc. IEEE Trans.— 1986.— Vol. 74, N 8.— P. 1107—1132.
5. Бабичев Г. Г., Козловский С. И., Романов В. А., Шاران Н. Н. Кремниевый однопереходный тензотранзистор // ЖТФ.— 2002.— Т. 47, № 4.— С. 66—71.
6. Babichev G. G., Kozlovskiy S. I., Romanov V. O., Sharan M. M. Silicon strain sensitive unijunction transistor with controlling $p-n$ -junction // Sensors and Actuators A.— 2002.— Vol. 100, N 1—2.— P. 236—243.

Д. т. н. Л. Ф. ВИКУЛИНА, В. А. МИНГАЛЁВ

Украина, г. Одесса, Академия связи Украины, СКБ «Молния»
E-mail: phys@usat.ukrtel.net

Дата поступления в редакцию
24.03 2004 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШЕВ
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

МОСТОВЫЕ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЕНСОРЫ

Чувствительность сенсоров на порядок выше известных за счет того, что все элементы моста реагируют на действие магнитного поля.

Магниточувствительные транзисторы широко применяются в измерительной технике и автоматике [1, 2]. Простейшим транзистором такого типа является одноколлекторный биполярный транзистор (ОМТ) в двухполюсном включении (рис. 1). В отсутствие магнитного поля инжектированные из эмиттера дырки движутся по кратчайшей траектории к коллектору (прямая O). Магнитное поле указанного направления отклоняет инжектированные дырки в сторону s -области с высокой скоростью рекомбинации на поверх-

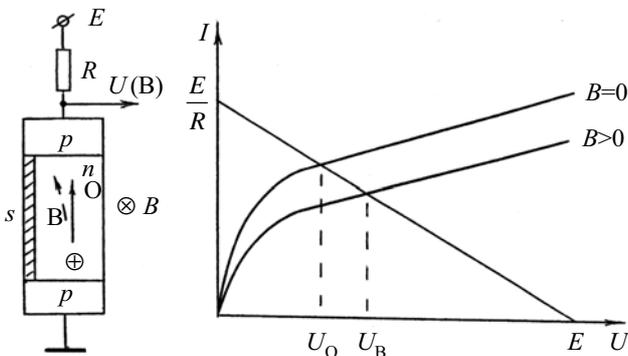


Рис. 1. Одноколлекторный магнитотранзистор и его выходные характеристики

ности n -базы (пунктир B), что уменьшает количество доходящих до p -коллектора дырок и его ток, а соответственно, и падение напряжения на нагрузочном резисторе. Выходной сигнал $\Delta U = U_B - U_O$ растет с увеличением индукции магнитного поля B .

Если вместо нагрузочного резистора использовать второй ОМТ с противоположным расположением s -области (рис. 2), то чувствительность сенсора возрастает более чем в 2 раза — вследствие того, что одновременно с ростом сопротивления одного ОМТ в магнитном поле уменьшается сопротивление другого ОМТ.

Добавив в схему еще два параллельно включенных ОМТ, получим измерительный мост, достоинством которого является, во-первых, то, что выходной сиг-

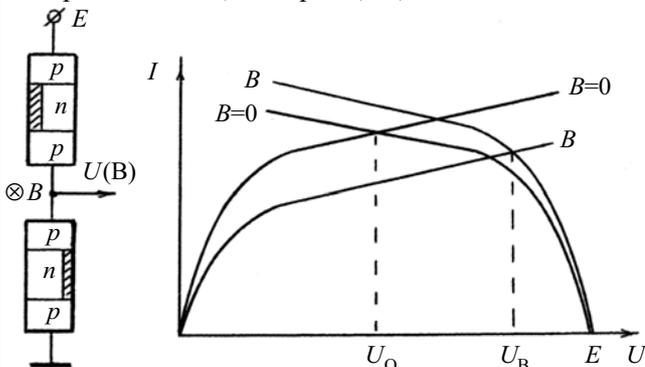


Рис. 2. Схема включения двух магнитотранзисторов и их характеристики