

К. ф.-м. н. С. Л. КОРОЛЮК, к. ф.-м. н. С. С. КОРОЛЮК,  
д. ф.-м. н. И. М. РАРЕНКО, О. Л. ТАРКО, А. В. ГАЛОЧКИН

Украина, Черновицкий нац. университет  
E-mail: microel@chdu.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
18.04 2001 г.  
Оппоненты д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК,  
к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ

## СОБСТВЕННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ ГРУППЫ $A_2^3B_3^6$ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННО СТОЙКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Предложена идея усилителя тока на основе собственных полупроводников, обладающих необходимой радиационной стойкостью в экстремальных условиях.*

Широкое использование радиоактивных материалов, особенно в экстремальных условиях, требует создания радиационно стойких элементов полупроводниковой электроники (датчиков, усилителей слабых сигналов, устройств силовой электроники). Традиционная полупроводниковая электроника на основе кремния и соединений  $A^3B^5$  быстро выходит из строя при сравнительно умеренных дозах радиации.

Существует класс радиационно высокостойких полупроводниковых материалов группы  $A_2^3B_3^6$  и их твердых растворов с материалами групп  $A^2B^6$ , которые выдерживают без изменения электрофизических свойств дозы  $\beta$ -,  $\gamma$ -, нейтронной и протонной радиации в  $10^2 - 10^3$  раз большие, чем при тех же условиях выдерживает основной материал электроники — кремний [1].

Это связано с тем, что в их тетраэдрической структуре  $1/3$  катионных узлов в решетке — пустые (типичным представителем этой группы является  $\text{In}_2[\text{v}]\text{Te}_3$ , где v — вакансия, то есть пустой узел кристаллической решетки). Эти стехиометрические вакансии, концентрация которых превышает  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , имеют особое свойство захватывать и электрически нейтрализовать все вводимые примеси (включая собственные точечные атомные дефекты, созданные под действием радиации), не давая им возможности стать донорами или акцепторами. В то же время они содействуют воссозданию кристаллической решетки после облучения высокими дозами, ибо атомы собственных компонентов, которые были удалены из узлов решетки радиационным излучением, благодаря большому числу вакансий за короткое время возвращаются обратно в узлы [1].

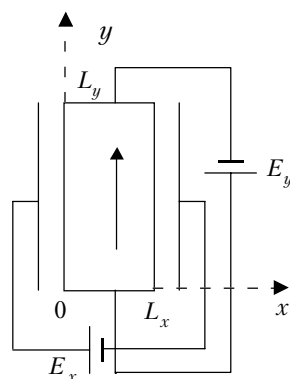
Эти материалы хороши для сенсоров  $\beta$ -,  $\gamma$ -, нейтронного, протонного излучения [1], они могут использоваться и для радиационно стойких ИК-фотоприемников. Но более важной задачей является создание радиационно стойких устройств электроники, способных управлять мощностью электрического тока, необходимых для предусилителей сенсоров и, особенно, для управления механизмами типа роботов для атомно-ядерной индустрии, космических

объектов. Однако создать из этих материалов транзистор или другие устройства традиционными методами (на основе  $p-n$ -переходов) невозможно, ибо, как отмечалось выше, при легировании этих полупроводников (ПП) даже большими концентрациями разного типа примесей они остаются собственными ПП.

Проведенные теоретические исследования [2] показали принципиальную возможность создания активных усиливающих устройств на собственных ПП, используя энергетические барьеры на их гетеропереходе. В данной работе рассматривается идея создания усиливающего устройства на собственном ПП, основанного на явлении увеличения (т. е. дополнительного генерирования) электронно-дырочных пар во внешнем электрическом поле. Это увеличение концентрации носителей тока впервые наблюдалось в опытах А. Ф. Иоффе [3, с. 201] и обусловлено уменьшением ионизационного потенциала атомов ПП в макроскопическом электрическом поле (эффект Зенера) [4, с. 112, 418].

На первый взгляд, этот эффект должен сказываться в электрических полях, сравнимых с внутриатомными, однако вследствие большого числа атомов в ПП увеличение количества электронно-дырочных пар может быть весьма существенным при умеренных полях. В [5] вычислено увеличение количества носителей в электрическом поле, возникающем на гетеропереходе двух собственных ПП, в [6] — в невырожденном собственном ПП, находящемся в однородном внешнем электрическом поле, в линейном приближении для потенциала, которое справедливо при небольших значениях разности потенциалов на ПП. В настоящей работе решалась задача для произвольной (но, естественно, допустимой) разности потенциалов.

В качестве примера численные расчеты проведены для собственного кремния как наиболее изученного в физическом и технологическом плане ПП. Рассматривается тонкая пластина Si толщиной  $L_x = l_D$  при температуре  $T = 300 \text{ К}$  ( $l_D$  — длина экранирования Дебая), поме-



Принципиальная схема усиливающего устройства на собственном полупроводнике

$\Delta V, В$	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,20	0,25	0,40	0,60	0,80	1,00	1,10
$\eta(z)$	1,001	1,055	1,158	1,322	1,718	5,671	1,111·10	7,524·10	6,371·10 <sup>2</sup>	4,594·10 <sup>3</sup>	4,159·10 <sup>4</sup>	1,893·10 <sup>5</sup>

ценная во внешнее электрическое поле плоского конденсатора, создаваемое источником ЭДС  $E_x$  (см. **рисунок**). Рассчитанная на ПЭВМ зависимость от носительной усредненной вдоль толщины пластины концентрации электронно-дырочных пар  $\eta(z)$  представлена в **таблице**, причем

$$\eta(z) = \frac{n(z)}{n(0)}; \quad (1)$$

$$z = \frac{e\Delta V}{2kT}, \quad (2)$$

где  $n(0), n(z)$  — усредненная концентрация электронно-дырочных пар при отсутствии и наличии поля;

- $e$  — абсолютное значение заряда электрона;
- $\Delta V$  — падение потенциала на ПП, созданное поперечной ЭДС  $E_x$ ;
- $k$  — постоянная Больцмана;
- $T$  — абсолютная температура.

В системе СИ выражение (2) можно записать так:

$$z = 5804 \frac{\Delta V}{T}.$$

При  $T=300K$

$$z = 19,3\Delta V. \quad (3)$$

Если ПП включить в цепь с ЭДС  $E_y$ , то ток  $I$  в цепи в направлении оси  $OY$  будет зависеть от поперечного электрического поля конденсатора, т. е. от  $\Delta V$ , т. к. при изменении  $\Delta V$  изменяется усредненная концентрация электронов и дырок. Другими словами, силу тока  $I$  можно регулировать изменением потенциала  $\Delta V$ , причем небольшие изменения  $\Delta V$ , как показывают вычисления, приводят к существенному изменению силы тока  $I$ . В этом и состоит идея создания усилителя на собственном ПП.

Приведем некоторые расчеты. Предположим, что подвижность носителей  $u$  не изменяется при их перераспределении в электрическом поле конденсатора. Тогда проводимость в направлении оси  $OY$

$$\sigma(z) = en(z)u. \quad (4)$$

Относительное изменение проводимости равно

$$\gamma(z) = \frac{\sigma(z) - \sigma(0)}{\sigma(0)}, \quad (5)$$

где  $\sigma(0)$  — проводимость при  $\Delta V$ .

Учитывая (1) и (4), получим:

$$\gamma(z) = \eta(z) - 1.$$

Пусть на ПП подается поперечное напряжение

$$\Delta V = \Delta V_0 + \delta V,$$

где  $\Delta V_0$  — некоторое постоянное напряжение;  $\delta V \ll \Delta V_0$  — малая переменная добавка.

Соответственно (2),

$$z = z_0 + \delta z, \quad z_0 = \frac{e\Delta V_0}{2kT}, \quad \delta z = \frac{e\delta V}{2kT}.$$

Тогда

$$\gamma(z) = \eta(z_0 + \delta z) - 1.$$

Разложим это выражение в ряд по  $\delta z$ :

$$\eta(z_0 + \delta z) = \eta(z_0) + \frac{d\eta(z_0)}{dz_0} \frac{\delta z}{\delta}.$$

Таким образом,

$$\gamma(z) = \gamma(z_0) + \delta\gamma,$$

где  $\delta\gamma = \frac{d\eta(z_0)}{dz_0} \frac{\delta z}{\delta}$  — изменение относительной проводимости ПП, которое обусловлено изменением поперечного напряжения на  $\delta V$ .

Возьмем  $\Delta V_0 = 1 В$ , что при комнатной температуре, в соответствии с (2), отвечает  $z_0 \approx 20$ . Значение производной, найденное как отношение конечных разностей из приведенной таблицы, равно  $1,5 \cdot 10^7$ , так что

$$\delta\gamma = 1,5 \cdot 10^7 \delta z.$$

Если  $\delta V = 10^{-5} В$ , то  $\delta\gamma = 10^2$ , т. е. малый переменный сигнал поперечного напряжения  $\delta V$  существенно изменяет продольную проводимость.

Таким образом, имеет место эффект управления величиной тока, протекающего через ПП, т. е. на собственном ПП имеет место усиливающее устройство. Естественно,  $\Delta V$  не должно быть больше некоторого граничного значения, чтобы напряженность электрического поля в ПП не достигла пробойного значения  $E_{пр}$ .

Приведем некоторые дополнительные оценки.

В собственном кремнии при комнатной температуре  $n_0 = 1,5 \cdot 10^{16} м^{-3}$ ,  $l_D = 2,4 \cdot 10^{-5} м$ , напряженность поля, при котором наступает электрический пробой,  $E_{пр} = 10^7 В/м$ . Если толщина образца  $L = l_D$ , то значение  $\Delta V$ , при котором наступает пробой, составляет

$$\Delta V_{пр} = E_{пр} l_D,$$

т. е. допробойные значения  $z$  удовлетворяют условию

$$z < 5804 \frac{E_{пр} l_D}{T}.$$

При  $T = 300 К$   $z < 4,6 \cdot 10^3$ , так что взятое напряжение  $\Delta V_0 = 1 В$  очень далеко от пробойного. Однако необходимо учитывать, что, как показывают расчеты, электрическое поле в полупроводнике неоднородно — вследствие экранирования зарядами оно максимально на краях полупроводника, и поэтому приведенная оценка для  $\Delta V_{пр}$  оказывается несколько завышенной.

Заметим, что успешная практическая реализация данной идеи возможна при подавлении поверхностных состояний, которые могут захватывать генерированные пары и существенно ухудшать параметры устройства. Вместе с тем проведенные экспериментальные исследования [7–10] выявили новое физическое явление, которое состоит в том, что плотность поверхностных состояний в области границ кристалла и на границе гетероперехода может быть уменьшена в 10–100 раз, если в область этих гра-

ниц ввести элементы переходной группы. Это позволяет надеяться, что данная проблема может быть успешно решена.

\*\*\*

Таким образом, приведенные расчеты показывают, что использование явления генерирования электронно-дырочных пар во внешнем электрическом поле открывает принципиальную возможность использования собственных полупроводников, в том числе радиационно высокостойких, для создания усилителя слабых сигналов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Koshkin V. M., Dmitriev Yu. P. Chemistry and physics of compounds with loose crystal structure // Chemistry Reviews. Harvard academic publisher. – 1994. – Vol. 19, part 2. – P. 139.
2. Gurevich Yu. G., Koshkin V. M., Volovichev I. N. The heterocontact of two intrinsic semiconductors and radiation stable electronics // Solid State Electr. – 1995. – Vol. 38, N 1. – P. 235–242.
3. Иоффе А. Ф. Избранные труды. – Т. 2. – М.: Наука, 1975.

4. Киреев П. С. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975.
5. Раренко І. М., Королюк С. Л., Москалюк С. С., Тарко О. Л. Генерація носіїв струму при утворенні гетероконтакту власних напівпровідників // Наук. вісн. Чернівецьк. університету. Фізика. – 1999. – Випуск 50. – С. 71–72.
6. Раренко І. М., Королюк С. Л., Королюк С. С. Власний напівпровідник в електричному полі // Там же. – С 5–7.
7. Баранский П. И., Беляев А. Е., Раренко И. М. и др. Явления переноса и рекомбинации в твердых растворах  $Mn_xHg_{1-x}Te$  ( $x < 0,1$ ) // Физика и техника полупроводников. – 1990. – Т. 24, № 8. – С. 1490–1495.
8. Гасан-заде С. Г., Жадько И. П., Раренко И. М. и др. Характеристики ФП и ФМЭ в кристаллах  $MnHgTe$  с анодоокислительными поверхностями // Там же. – 1992. – Т. 26, № 6. – С. 1100–1103.
9. Боднарук О. А., Вертий А. А., Раренко И. М. и др. Комплексное исследование узкощелевых полупроводников типа  $p-MnHgTe$  // Там же. – 1996. – Т. 30, № 7. – С. 1236–1243.
10. Sun Weiguo, Kosyachenko L. A., Rarenko I. M. Anodic fluoride on  $HgMnTe$  // J. Vac. Sol. Technol. – 1997. – Vol. A 15, N 4. – P. 782–786.

### Редакция журнала

#### "Технология и конструирование в электронной аппаратуре"

просит Вас поинтересоваться,

подписана ли Ваша организация на журнал "ТКЭА" на 2002 год

(индекс в подписных каталогах — **71141**, периодичность — 6 номеров).

Подписку можно оформить не только в почтовом отделении, но и непосредственно через редакцию. Для этого соответствующую сумму (цена одного номера — 15 грн.) необходимо перевести в адрес редакции **по почте** (Украина, 65028, Одесса, ул. Б. Хмельницкого, 59) или **на указанный расчетный счет**.

#### Реквизиты для перечисления на счет

##### ✓ в гривнах:

**Получатель** ДП "Нептун-Технология", ОКПО 24543343.

**Банк получателя:** Отд. № 6 "Ильичевское" ЦО ПИБ в г. Одессе, МФО 328135, р/с 26002301535969.

**Назначение платежа:** за подписку на журнал "ТКЭА".

##### ✓ в российских рублях:

**Получатель:** Проминвестбанк Украины.

**Корсчет:** корсчет типа К № 30122810400000000284.

**Банк получателя:** ИНН 7707083893 Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, корсчет № 30101810400000000225 в ОПЕРУ Московского ГТУ Банка России.

**Назначение платежа:** для ДП "Нептун-Технология", ОКПО 24543343, р/с 26002301535969, код 810 в отд. № 6 "Ильичевское" ЦО ПИБ в г. Одессе, МФО 328135, за подписку на журнал "ТКЭА".

