

Токоперенос в детекторах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом

© Г.И. Айзенштат[¶], М.А. Лелеков, В.А. Новиков, Л.С. Окаевич, О.П. Толбанов

Томский государственный университет,
634034 Томск, Россия

(Получена 26 сентября 2006 г. Принята к печати 3 октября 2006 г.)

Показано, что, несмотря на линейность вольт-амперных характеристик детекторов ионизирующего излучения из полуизолирующего арсенида галлия, компенсированного хромом, токоперенос в приборе определяется наличием барьерных контактов на аноде и катоде. Для дырок анодный контакт является антизапорным и ведет себя как омический контакт, а для электронов катодный контакт является запорным. Это приводит к истощению электронами активной области в рабочем режиме. Показано, что данный эффект может привести к трехкратному снижению темновых токов по сравнению с расчетным значением предельного тока в резистивной структуре на основе полуизолирующего арсенида галлия, что позволяет снизить шумы детектора.

PACS: 42.79.Pw, 72.20.Fr, 73.40.Cg, 73.40.Sx, 85.30.De, 87.66.Pm

1. Введение

Большинство работ, посвященных детекторам ионизирующего излучения на основе арсенида галлия, выполнено на нелегированном полуизолирующем материале, выращенном методом Чохральского [1]. Данный материал содержит сравнительно высокую концентрацию глубоких центров типа *EL2* с резкой зависимостью сечения захвата электронов от напряженности электрического поля [2]. Наличие этих центров обуславливает нелинейное распределение электрического поля в приборе в статическом режиме и приводит к нелинейной вольт-амперной характеристике (*ВАХ*) прибора с протяженным участком насыщения тока. В *GaAs*-детекторе металлический катод формируют в виде контакта с барьером Шоттки к полупроводнику. Такой контакт выполняет роль затравочной неоднородности для формирования статического рекомбинационного домена [3]. В области домена, в сильном электрическом поле, происходит разделение неравновесных электронов и дырок, возникающих при воздействии ионизирующего излучения. Детальный анализ токопереноса для статического режима работы детектора на нелегированном полуизолирующем материале проведен в работе [4]. Совершенно по-иному ведут себя детекторы, изготовленные из полуизолирующего компенсированного хромом арсенида галлия, *GaAs(Cr)*, удельное сопротивление которого на 2 порядка выше. Здесь, в отличие от ранее упомянутых приборов, вольт-амперные характеристики почти линейны [5]. Интерес к особенностям токопереноса в приборах из *GaAs(Cr)* актуален в связи с началом их серийного производства и отсутствием в литературе исчерпывающих данных о физике работы таких приборов.

Цель настоящей работы заключается в рассмотрении особенностей токопереноса в детекторах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом.

2. Барьер на границе контакта металл–*GaAs(Cr)*

Исследовались детекторные структуры на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, с удельным сопротивлением $\sim 10^9$ Ом·см. Анодный и катодный контакты создавались путем вакуумного напыления системы металлов ванадия и золота. Поверхность *GaAs*, заключенного между металлическими катодным и анодным контактами, сканировали лучом инфракрасного светодиода (с длиной волны 0.87 мкм) через световод с диаметром сердцевины 10 мкм. На детектор смещение не подавалось; при сканировании измерялся наведенный ток. На рис. 1 представлены зависимости величины наведенного тока *I* от положения светового зонда *x* для детекторов, изготовленных как из компенсированного *Cr*, так и из нелегированного полуизолирующего материала. В обоих случаях, как видно из рис. 1, регистрируется возникновение тока вблизи контактов. Этот ток обусловлен наличием электрического поля у контактов, в котором разделяются неравновесные электроны и дырки, генерируемые светом. Для нелегированного полуизолирующего арсенида галлия существование электрического поля у контакта вследствие наличия барьера на границе с металлом является хорошо установленным фактом [6,7]. Результаты нашего эксперимента (рис. 1) свидетельствуют о наличии барьеров Шоттки на границах и для детектора из арсенида галлия, компенсированного хромом. Различие заключается лишь в амплитуде выходного сигнала. Максимальная амплитуда выходного тока I_{\max} в первом приближении должна быть пропорциональна эффективной площади светового пятна $S_{\text{эф}}$, из которого носители заносятся в область высокого поля контакта, и в соответствии с теоремой Рамо–Шокли прямо пропорциональна толщине области существования поля вблизи контакта x_0 и обратно пропорциональна длине детектора L : $I_{\max} \propto S_{\text{эф}}x_0/L$. В нелегированном материале $x_0 \approx 10$ мкм [7]. Исходя из данных наве-

[¶] E-mail: ayzen@mail.tomsknet.ru

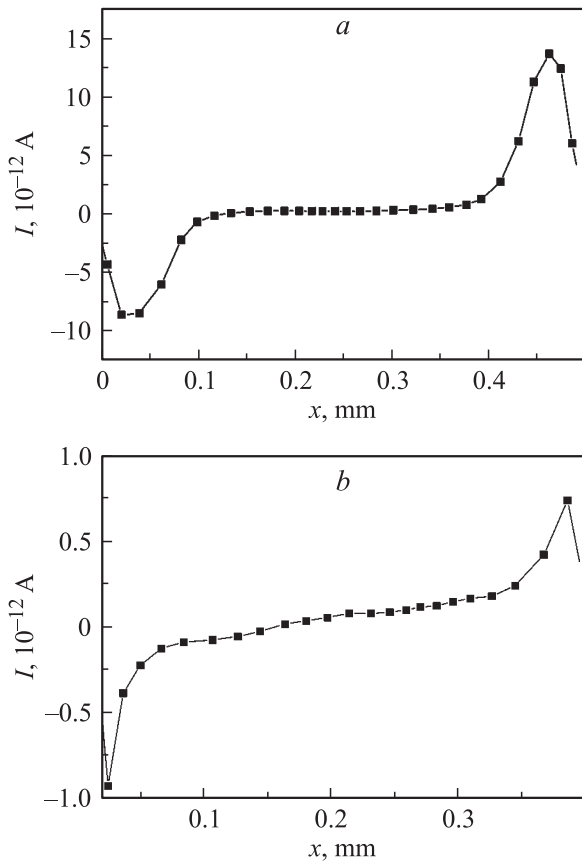


Рис. 1. Сигналы с детекторных структур при сканировании световым зондом в случае нелегированного полуизолирующего GaAs при $L = 490$ мкм (а) и компенсированного хромом GaAs при $L = 375$ мкм (б).

денных токов (рис. 1), а также с учетом того, что для детектора из нелегированного полуизолирующего материала $L = 490$ мкм, а в случае компенсированного хромом арсенида галлия $L = 375$ мкм, была произведена оценка величины x_0 для компенсированного материала: $x_0 \approx 0.4$ мкм. Таким образом, экспериментально установлено наличие электрического поля у контактов, а следовательно, и существование барьеров Шоттки на границе металл–полупроводник для детекторов из компенсированного материала.

3. Физика токопереноса в GaAs(Cr)-детекторах

Будем считать для определенности, что удельное сопротивление материала близко к значению $\rho \sim 10^9$ Ом·см, подвижность электронов $\mu_n = 3000$ см²/В·с, а произведение постоянной Холла R_H на проводимость σ отрицательно и по порядку величины равно 1000 см²/В·с. При этом концентрация электронов в зоне проводимости будет составлять $n_0 \approx 6 \cdot 10^5$ см⁻³, а дырок в валентной зоне $p_0 \approx 8 \cdot 10^6$ см⁻³. Расчеты показали, что в этих условиях

уровень Ферми (F) в объеме полупроводника будет лежать в середине запрещенной зоны (на 0.71 эВ ниже дна зоны проводимости). Именно такой материал используется для создания детекторов [5]. С учетом того что на границах детекторной структуры присутствуют барьеры Шоттки, а удельное сопротивление объема детектора предельно высокое и поэтому большая часть приложенного напряжения падает на этом объеме, энергетическая диаграмма структуры может быть представлена в соответствии с рис. 2. На анодной границе изгиб энергетических зон приводит к появлению антизапорных, обогащенных дырками, слоев. Известно, что такие слои „работают“ как омические контакты и могут служить неограниченным „резервуаром“ дырок [8]. Ток дырок через анодный контакт будет определяться известным выражением [9]

$$I_p = SA^*T^2 \exp \left[-\frac{q(\varphi_{Bp} + \varphi_{Bi})}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{qV_1}{kT} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где S — площадь анода, A^* — постоянная Ричардсона, q — заряд электрона, T — температура, k — постоянная Больцмана, φ_{Bi} — изгиб зоны, V_1 — падение

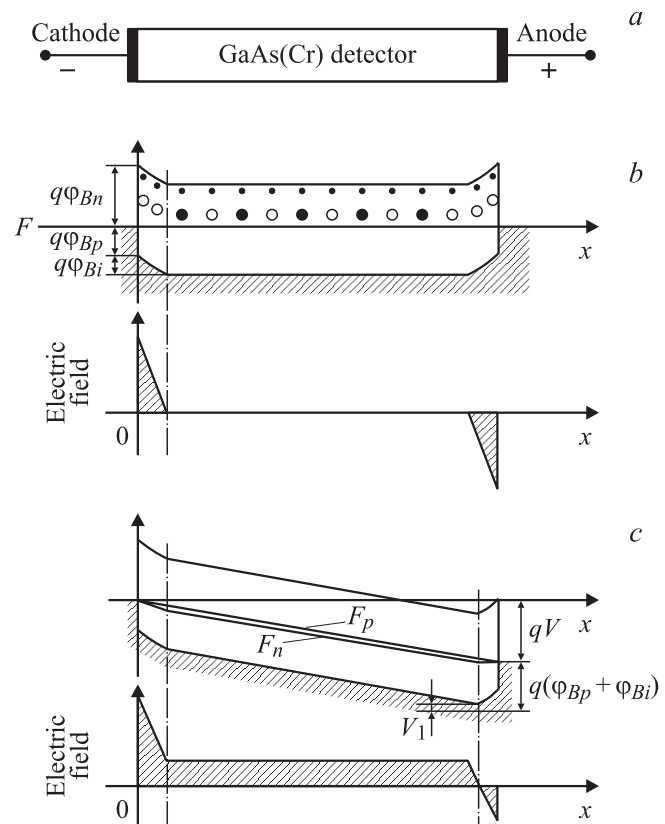


Рис. 2. Модель детектора (а), энергетическая диаграмма и распределение электрического поля в детекторе при нулевом смещении (б), энергетическая диаграмма и распределение электрического поля в детекторе при смещении, отличном от нуля (с). б — схематически показаны мелкие донорные уровни и глубокие уровни примеси хрома.

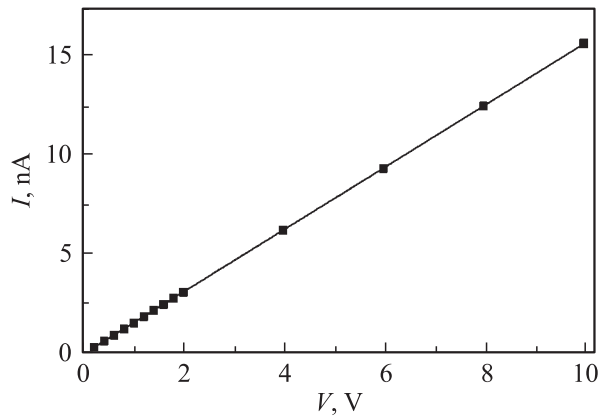


Рис. 3. ВАХ детектора, рассчитанная из выражения (1) в пренебрежении током электронов. $T = 300$ К.

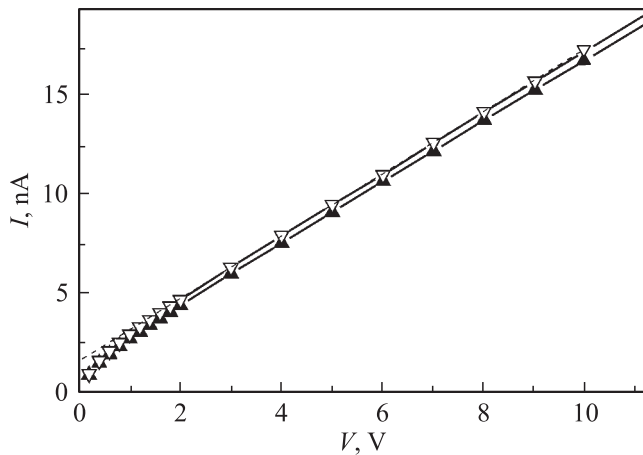


Рис. 4. Измеренные ВАХ детектора для разных полярностей напряжения. $T = 300$ К.

напряжения на переходе, $\varphi_{Bp} = 0.52-0.58$ эВ — высота барьера для дырок. В области катодного контакта для дырок, движущихся из активной области детектора, нет барьера, и эта область будет работать как коллектор транзистора. С другой стороны, катод детектора является запирающим контактом для электронов. Оценка предельного значения электронной составляющей плотности тока показывает, что она примерно равна 7 нА/см². Генерационно-рекомбинационный ток в переходе составляет ~ 6 нА/см². При этом дырочная составляющая, в силу выражения (1), может быть значительно больше электронной. Это значит, что в активной области начиная с некоторого напряжения дырочная составляющая тока будет доминировать, поскольку предельный ток электронов из металла в полупроводник будет ограничен обратным током диода:

$$I_n = SA_n^* T^2 \exp\left(-\frac{q\varphi_{Bn}}{kT}\right). \quad (2)$$

Здесь S — площадь сечения, $\varphi_{Bn} = 0.83$ эВ [2], $A_n^* = 8.16$ А/см² · К² [5].

При этом в активной области возникнет ситуация, когда концентрация электронов будет меньше равновесного значения, а квазиуровни Ферми для дырок (F_p) и электронов (F_n) будут различаться (рис. 2). Особенностью данной ситуации является то, что истощение электронами активной области не вызывает заметного искажения электрического поля в детекторе в силу низкой равновесной концентрации электронов. Мы рассчитали ВАХ детектора в пренебрежении электронным током, полагая, что $V_1 = V - I_p R$, где V — приложенное к детектору напряжение, R — сопротивление детекторной структуры. Расчетная ВАХ $I(V)$ представлена на рис. 3, откуда следует, что для данного случая ВАХ должна быть линейна во всем диапазоне напряжений.

Реальные вольт-амперные характеристики детекторов, изготовленных из полуизолирующего арсенида галлия, компенсированного хромом, представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4, ВАХ детектора в диапазоне напряжений от нуля до 1 В является нелинейной. Именно в этом диапазоне напряжений происходит постепенное истощение активной области электронами за счет ограничения поставок электронов из катода. Убедительным доказательством этого является то, что в области напряжений выше 2 В дифференциальное сопротивление детектора, а значит, и соответствующее ему удельное сопротивление становятся намного выше предельно возможного значения. Для полуизолирующего арсенида галлия предельно высокое удельное сопротивление при 300 К равно $\rho_{\max} = 1/(2qn_i\sqrt{\mu_n\mu_p}) \approx 1.4$ ГОм · см (n_i — собственная концентрация носителей, μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок), а величина ρ , найденная из экспериментальной ВАХ, оказалась в 3.5 раза выше.

Измерения вольт-амперных характеристик детекторов проводились на прямоугольных образцах площадью $S = 0.1$ см² и толщиной $L = 130$ мкм. Полученное

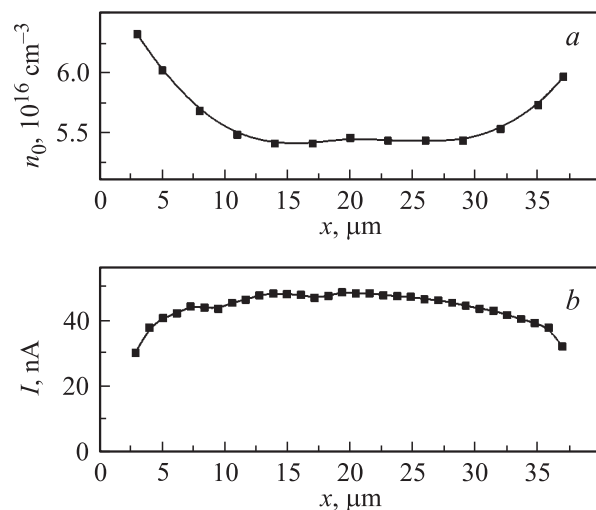


Рис. 5. Исходное распределение концентрации равновесных электронов вдоль пластины диаметром 40 мм (а), распределение темновых токов в координатном детекторе, изготовленном из данной пластины после диффузии в нее хрома (б).

дифференциальное сопротивление детектора равнялось 0.632 ГОм при 300 К (рис. 4), что соответствовало удельному сопротивлению $\rho = 4.9$ ГОм · см.

Итак, получен интересный результат, чрезвычайно важный с практической точки зрения. Показано, что хотя вольт-амперная характеристика детектора близка к линейной и прибор ведет себя как резистивный элемент, темновые токи в детекторе из арсенида галлия, компенсированного хромом, могут быть в несколько раз ниже, чем значения, рассчитанные из известного удельного сопротивления для данного материала; это в конечном итоге должно привести к снижению собственных шумов детектора.

Рассмотрим экспериментальные данные, представленные на рис. 5, также подтверждающие нашу модель. На рис. 5, *a* показано распределение равновесной концентрации электронов n_0 на пластине арсенида галлия вдоль выбранного направления x до диффузии в нее хрома, а на рис. 5, *b* соответствующая этому распределению зависимость темновых токов в координатном детекторе, изготовленном на пластине после диффузии. (Площадь отдельного канала детектора равна 0.18 см², толщина 1 мм). В областях, где концентрация электронов была выше среднего значения и где поэтому в полуизолирующем арсениде галлия дырочная компонента проводимости должна быть ниже, чем в остальной части пластины, измеренные величины темнового тока в каналах детектора тоже ниже. Это легко объяснить, если принять во внимание результаты наших выводов о том, что темновой ток в детекторе из GaAs(Cr) обусловлен только дырочной компонентой тока.

4. Заключение

Рассмотрена физическая модель протекания темнового тока в детекторах ионизирующего излучения на основе GaAs(Cr). Экспериментально показано, что на границе металл–GaAs(Cr) присутствует барьер Шоттки. Существующий барьер на границах металл–полупроводник изгибает энергетические зоны таким образом, что на этих границах присутствуют слои, обогащенные дырками. Для дырок анодный контакт является антизапорным и ведет себя как омический, а для электронов катодный контакт является запорным. Это приводит к истощению электронами активной области в рабочем режиме. Показано, что данный эффект может привести к трехкратному снижению темновых токов по сравнению с расчетным значением предельного тока в резистивной структуре на основе полуизолирующего арсенида галлия.

Список литературы

- [1] C.M. Buttar. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **395**, 1 (1997).
- [2] V.Ya. Prinz, S.N. Rechkunov. Phys. Status Solidi B, **118** (1), 159 (1983).

- [3] В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, А.Г. Миронов. *Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [4] M. Rogalla, K. Runge. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **434**, 44 (1999).
- [5] A.V. Tyazhev, D.L. Bubnitsky, O.B. Koretskay, V.A. Novikov, L.S. Okaevich, A.I. Potapov, O.P. Tolbanov, A.P. Vorobiev. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **509**, 34 (2003).
- [6] R. Irsigler, R. Geppert, R. Göppert, J. Ludwig, M. Rogalla, K. Runge, Th. Schmid, M. Webel, C. Weber. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **395**, 71 (1997).
- [7] M. Aliettiet. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **355**, 420 (1995).
- [8] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [9] S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (N.Y., 1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Current transport in gallium arsenide detector compensated by chromium

G.I. Ayzenshtat, M.A. Lelekov, V.A. Novikov,
L.S. Okaevitch, O.P. Tolbanov

Tomsk State University,
634034 Tomsk, Russia

Abstract It is shown that current transport in semi-insulating gallium arsenide detector compensated by chromium is defined by presence of barrier contact at the anode and cathode, although linear behavior of current–voltage characteristic in such device is observed. The anode contact is anti-blocking for holes and indicates ohmic behavior, while for electrons, the cathode contact is blocking. As a result, the active region is depleted of electrons in operating regime. It has been shown that this effect may lead to triple reduction of the leakage current as compared to the calculated limit current value for a resistive structure on the base of semi-insulating gallium arsenide. It is necessary for the reduction of detector noises.