

ТЕНЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНТАКТАХ МЕТАЛЛ—АРСЕНИД ГАЛЛИЯ ПРИ АНИЗОТРОПНОМ ДАВЛЕНИИ

Вяткин А. П., Крылова И. В., Максимова Н. К.,
Филонов Н. Г., Филатов В. И.

Изучена физическая природа низкотемпературных прямых избыточных токов в диодах с барьером Шоттки. Для решения этой задачи исследованы обратимые и необратимые искажения ВАХ контактов Ni/Pd/GaAs, возникающие при 77 К под действием локального анизотропного давления. Изучена зависимость аномальных тензоэлектрических эффектов от величины нагрузки и диаметра индентора, обнаружен гистерезис при проведении нагрузочно-разгрузочных циклов. Выполнен расчет температурной зависимости ВАХ в рамках модели контакта, содержащего локальные участки с пониженной высотой барьера. На основе анализа экспериментальных данных и результатов расчета обсуждается механизм влияния механических напряжений на электрические характеристики и стабильность диодов с барьером Шоттки.

Для выяснения механизмов деградации приборов с барьером Шоттки важным является изучение физической природы избыточных токов, которые часто наблюдаются при низких температурах измерения (150—77 К) в области малых прямых напряжений смещения и свидетельствуют о потенциальной ненадежности контактов [1, 2]. Установлено, что появление этих токов в значительной степени связано с упругими механическими напряжениями, существующими в структурах [1, 3, 4], а также наведенными внешним неоднородным давлением [4, 5]. Однако механизм влияния механических напряжений на процесс прохождение носителей заряда остается дискуссионным.

В настоящей работе продолжено исследование тензоэлектрических явлений в контактах металл—арсенид галлия, подвергнутых анизотропному давлению. В качестве инденторов использовали цилиндрические стержни, диаметры которых варьировали от 30 до 150 мкм. Давление осуществляли в центре или на периферии контактных площадок диаметром 200 мкм (рис. 1).

Контакты формировали послойным электрохимическим осаждением Pd (~0.4 мкм) и Ni (~0.1 мкм) на эпитаксиальные структуры $n-n^+-GaAs$ с концентрацией носителей заряда в n -слое $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Диоды с такой металлизацией отличаются высокой термостабильностью параметров [6] и используются в практических разработках. Вольтамперные характеристики (ВАХ) измеряли до индентирования при действии давления и после сброса давления. Вольтфарадные характеристики изучали до индентирования и после него.

Диоды Ni/Pd/GaAs при комнатной температуре имели ВАХ, близкие к идеальным (параметр неидеальности < 1.1), высота барьера $\varphi_B = 0.87 \div 0.9 \text{ эВ}$ (рис. 2). При понижении температуры наблюдались избыточные токи, которые приводили либо к увеличению параметра n (рис. 2, кривая 4), либо к искажению прямой ветви ВАХ (появлению «ступеньки»). Для оценки отклонения низкотемпературных характеристик от рассчитанных на основе значений φ_B , измеренных при комнатной температуре (рис. 2, кривая 5), были выбраны параметры ΔV и $\varphi_{\text{эф}}$. Величину ΔV оценивали по разности напряжений между расчетной и реальной характеристиками на уровне тока $I = 10^{-10} \text{ А}$ (рис. 2). Для интерпретации ВАХ с избыточными токами часто используется модель контакта, содер-

жащего участка (назовем их каналами) с пониженной высотой потенциального барьера [7]. В рамках этой модели $\varphi_{эфф}$ характеризует каналы с минимальной высотой барьера.

При давлении в центре контактной площадки индентором с диаметром 150 мкм при 300 К высота барьера увеличивается, причем относительная тензочувствительность прямого тока $\gamma_I = (1.4 \div 1.6) \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$, что соответствует 1/3 от величины γ_I при всестороннем сжатии [8, 9]. Резко неоднородная компонента деформации, развивающаяся вблизи края индентора, действует на малой площади и при 300 К не оказывает заметного влияния на ВАХ контактов. Поэтому мерой давления под индентором считали величину нагрузки, отнесенную к площади соприкосновения.

В результате исследований, выполненных при 77 К, установлены следующие закономерности.

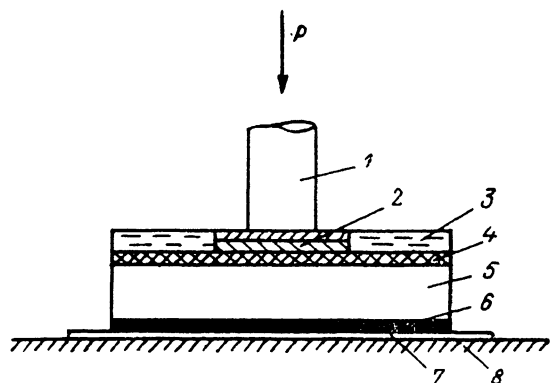


Рис. 1. Схематическое изображение контакта металл-полупроводник при индентировании.

1 — индентор, 2 — барьерообразующие металлы, 3 — слой SiO_2 , 4 — эпитаксиальный слой $n\text{-GaAs}$, 5 — сильно легированная подложка $p^+\text{-GaAs}$, 6 — омический контакт, 7 — оловянная прокладка, 8 — металлическое основание.

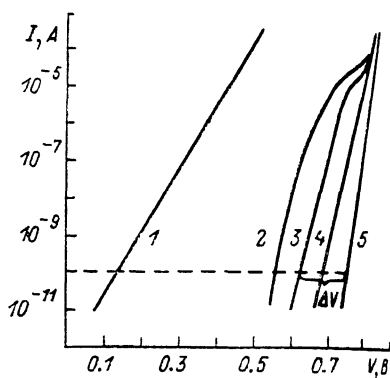


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ контактов Ni/Pd/GaAs, недеформированных (1, 4) и подвергнутых давлению.

$P \cdot 10^{-8}$, Па: 3 — 2.5, 2 — 5.7. Диаметр индентора 30 мкм, температура измерения T , К: 1 — 300, 2—4 — 77. 5 — ВАХ при 77 К, рассчитанная на основе φ_s , измеренного при 300 К.

Индентирование центра контактных площадок приводит к появлению аномальных тензоэлектрических эффектов, причем существуют три области давлений, в которых характер изменения ВАХ различается. Увеличение анизотропного давления до некоторого значения P_1 приводит к росту избыточных токов (и ΔV), т. е. к локальному снижению высоты барьера (рис. 2, 3). В области более высоких давлений (от P_1 до P_2) дальнейшего увеличения ΔV (снижения $\varphi_{эфф}$) не происходит, имеет место эффект насыщения (рис. 3). Величина $\varphi_{эфф}$ при $P = \text{const}$ тем ниже, чем больше диаметр индентора. При $d_{ин} = 30 \div 70 \text{ мкм}$ $P_1 \approx (4 \div 6) \cdot 10^8 \text{ Па}$, $P_2 \approx (11 \div 12) \cdot 10^8 \text{ Па}$, при $d_{ин} = 150 \text{ мкм}$ $P_1 \approx (2.5 \div 3) \cdot 10^8 \text{ Па}$, $P_2 \approx (4 \div 5) \cdot 10^8 \text{ Па}$. В области давлений $\leq P_2$ искажение характеристик является обратимым: при снятии давления или при нагревании образцов до комнатной температуры ВАХ возвращается к исходным. При проведении нагрузочно-разгрузочных циклов было зафиксировано явление гистерезиса (рис. 4). В области $P > P_2$ имеет место необратимое изменение характеристик, причем после сброса давления ΔV уменьшается, а параметр неидеальности, измеренный при 77 К, растет по сравнению с исходными ΔV и n .

При индентировании периферии контактов ($d_{ин} = 70 \text{ мкм}$) наиболее существенное искажение ВАХ происходило при $P = (2.5 \div 3.5) \cdot 10^8 \text{ Па}$ ($\varphi_{эфф} \approx 0.4 \text{ эВ}$), затем $\varphi_{эфф}$ увеличивается до значений, характерных для индентора с таким же диаметром в центре контакта. В области $P \approx (4 \div 8) \cdot 10^8 \text{ Па}$ имеет место эффект насыщения, при $P > 8 \cdot 10^8 \text{ Па}$ $\varphi_{эфф}$ вновь снижается. Эксперимент при давлении индентором с $d_{ин} = 150 \text{ мкм}$ при 77 К ограничивался значениями $P \approx (4 \div 5) \times 10^8 \text{ Па}$, так как при более высоких нагрузках часто происходило разрушение образцов.

Емкостные характеристики диодов и вычисленная на их основе концентрация носителей заряда в полупроводнике после индентирования не изменяются.

Чтобы оценить применимость модели контакта, содержащего участки с пониженной высотой барьера, для анализа механизма появления низкотемпературных избыточных токов были рассчитаны ВАХ диода в предположении, что параллельно основному контакту подключен канал, характеризующийся пониженной высотой барьера φ_k , меньшим значением площади S_k и высоким (вследствие локальности) последовательным сопротивлением R_k [7]. Основным механизмом прохождения носителей заряда считали термоэлектронную эмиссию. Предполагали, что при малых напряжениях смещения измеряемый ток I равен току через канал I_k , $S_k \ll S$, $R_k \gg R$, температура в канале T_k и его удельная проводимость ρ_k не отличаются от значений соответствующих параметров T

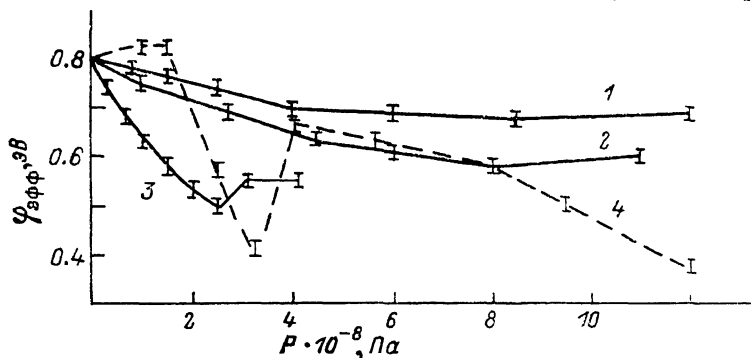


Рис. 3. Зависимость $\varphi_{эфф}$ от величины давления под индентором.

Диаметр индентора, мкм: 1 — 30, 2, 4 — 70, 3 — 150. 1—3 — при индентировании центра контактной площади, 4 — при индентировании периферии контакта.

и ρ основного контакта. Учитывая, что в контактах может присутствовать несколько участков с пониженной высотой барьера, получили следующее выражение для прямой ветви ВАХ:

$$I = I_T \left[1 + \sum \Delta S_{ki} \exp\left(\frac{\Delta\varphi_{ki}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{qIR_{ki}}{kT}\right) \right],$$

$$I_T = AST^2 \exp\left(-\frac{\varphi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right).$$

Здесь $\Delta S_{ki} = S_{ki}/S$, $\Delta\varphi_{ki} = \varphi_B - \varphi_{ki}$, где φ_{ki} , S_{ki} , R_{ki} — параметры i -го канала. В настоящей работе данная модель использовалась при численном расчете ВАХ на ЭВМ. Из построенных по полученным данным графиков видно, что теоретические зависимости ВАХ (рис. 5) согласуются с экспериментальными. Параметры каналов приведены в таблице.

№ канала	φ_k , эВ	R_k , Ом	$S_k \cdot 10^{-8}$, см ²
1	0.75	10^3	0.8
2	0.7	10^4	0.4
3	0.65	10^5	0.13
4	0.6	10^6	0.008

Используя установленные экспериментально закономерности, обсудим вопрос о природе локального снижения высоты барьера. Реальное уменьшение φ_B под действием анизотропного давления может происходить в области напряжений растяжения, возникающих на периферии индентора, а также сосредоточенных вблизи внутренних концентраторов напряжений. Концентраторы могут быть обусловлены структурно-фазовыми неоднородностями, наблюдающи-

мися на реальных границах металл—GaAs [10]. Численные оценки на основе известной величины $\gamma_{\varphi} = 11.7 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па [9] показывают, что незначительные искажения характеристик могут быть объяснены в рамках этой модели. Однако для снижения барьера до измеренных экспериментально значений $\varphi_{\text{эфф}} \approx 0.4 \div 0.6$ эВ необходимы давления, превышающие $10^9 \div 10^{10}$ Па. Теоретический предел упругости арсенида галлия составляет $2 \cdot 10^9$ Па [11]. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал [12], свидетельствующий о том, что пластическая деформация приповерхностных слоев материалов начинается при напряжениях, значительно меньших, чем напряжения, необходимые для пластической деформации внутренних слоев, т. е. в арсениде галлия и тем более под контактом вблизи поверхности трудно предположить существование растягивающих напряжений, достигающих $10^9 \div 10^{10}$ Па в локальных областях площадью до 1 мкм^2 .

Более вероятным, по нашему мнению, является механизм снижения высоты

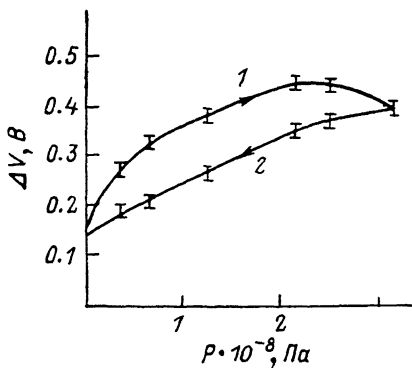


Рис. 4. Зависимость ΔV от величины давления под индентором ($d_{\text{ин}} = 150 \text{ мкм}$).

1 — при увеличении нагрузки, 2 — при снижении нагрузки.

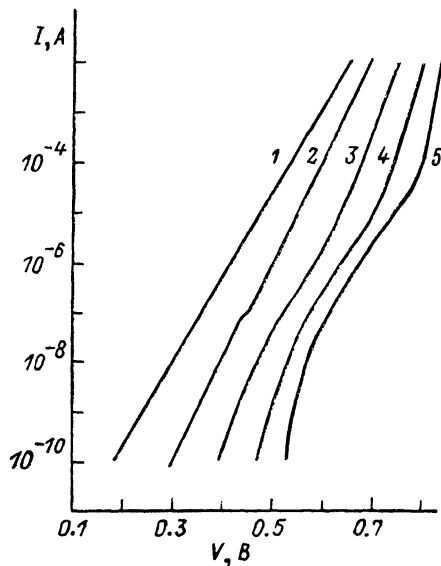


Рис. 5. Расчетные прямые ветви ВАХ контактов с учетом четырех каналов в зависимости от температуры.

$T, \text{ К}$: 1 — 300, 2 — 245, 3 — 190, 4 — 135, 5 — 80.

барьера за счет взаимодействия упругих напряжений с дефектами и примесями в активной области контакта. По-видимому, при индентировании под действием градиентов напряжений, сосредоточенных вблизи внешних (края индентора) и внутренних концентраторов, происходит перераспределение собственных дефектов и примесей, изменение параметров их энергетических уровней [11]. Возникают локальные участки с повышенным содержанием мелких и глубоких центров. Ранее было установлено [4], что появление низкотемпературных аномалий под действием неоднородного давления сопровождается возникновением пиков на кривых термостимулированных токов, хотя для недеформированных диодов такие пики отсутствовали. При сбросе давления за счет возвратных упругих сил происходит восстановление исходного распределения дефектов, при этом пики на кривых ТСТ исчезают. Важную роль в формировании глубоких уровней могут играть дефекты вакансионного типа, высокая концентрация которых была обнаружена в приконтактной области GaAs методом электронно-позитронной аннигиляции [13]. Отметим, что определяющая роль концентраторов напряжений в происхождении аномальных тензоэлектрических эффектов в туннельных $p-n$ -переходах при гидростатическом давлении была показана в работе [14].

Таким образом, в каналах происходит, по-видимому, не реальное снижение изгиба зон, а эффективное понижение высоты барьера за счет появления токов другой природы. Прежде всего возможно формирование участков с тонким n^+ -слоем у поверхности, обеспечивающим туннелирование носителей заряда через вершину барьера [15]. Уровни, расположенные вблизи середины запрещенной зоны полупроводника, могут стимулировать появление рекомбинационного

прямого тока. Наконец, возможны туннельно-резонансные и туннельно-рекомбинационные токи с участием глубоких уровней [1]. Если собственные дефекты в приповерхностной области полупроводника принимают участие в формировании системы поверхностных электронных состояний (ПЭС), определяющих закрепление уровня Ферми, возможно и реальное снижение высоты барьера за счет неоднородного распределения ПЭС в присутствии локальных напряжений.

С этой точки зрения находят удовлетворительное объяснение основные наблюдаемые экспериментально закономерности. Гистерезис зависимости $\Delta V(P)$ (рис. 4) при нагружении и разгрузке образцов связан с инерционностью процесса перестройки дефектов структуры при изменении градиента упругих напряжений. Зависимость ΔV и $\varphi_{\text{эфф}}$ от диаметра индентора вызвана тем, что с ростом $d_{\text{ин}}$ от 30 до 70 мкм все большее число концентраторов оказывается в сфере действия анизотропного давления. Усиление и особенности аномальных тензозлектрических эффектов при индентировании периферии контактов, а также при $d_{\text{ин}} = 150$ мкм, приближающемся к диаметру контакта (200 мкм), обусловлены усилением неоднородной компоненты деформации за счет периферийных напряжений, действующих в структурах [1], а также большей дефектностью периферии.

Эффект насыщения роста искажений ВАХ в интервале давлений от P_1 до P_2 (рис. 3) связан с тем, что при высоких нагрузках наведенные индентором локальные упругие напряжения увеличиваются медленнее нагрузки за счет частично обратимой микропластической деформации вблизи концентраторов. Как показали численные оценки, увеличение площади соприкосновения в случае использованных нами инденторов несущественно.

Необратимые изменения ВАХ при высоких давлениях ($> P_2$) обусловлены, по-видимому, пластической деформацией и формированием микротрещин. Генерация дислокаций вблизи концентраторов может оказывать влияние на их форму и приводить к снижению коэффициента концентрации напряжений [14]. Возникают дефекты пластической деформации с глубокими уровнями в запрещенной зоне арсенида галлия [11]. При этом возможно изменение параметров действующих каналов и появление новых, что и приводит к снижению ΔV и увеличению параметра неидеальности ВАХ, измеренных при 77 К. Образование микротрещин, которые фиксируются визуально в оптическом микроскопе, сопровождается появлением омических токов утечки, происходит деградация характеристик диодов.

Таким образом, установленные в работе закономерности свидетельствуют в пользу модели, согласно которой возникновение низкотемпературных искажений ВАХ диодов с барьером Шоттки обусловлено взаимодействием локальных механических напряжений, сосредоточенных главным образом вблизи концентраторов, с ансамблем дефектов и примесей в полупроводнике. Наличие таких участков способствует дальнейшему развитию структурно-фазовых неоднородностей на границе металл—полупроводник в процессе испытаний и эксплуатации приборов и ускоряет деградацию их параметров.

Список литературы

- [1] Filonov N. G., Maksimova N. K., Vyatkin A. P. et al. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V 83. N 2. P. 701—708.
- [2] Божков В. Г., Ковтуненко Г. Ф., Абрамчиков Т. А. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводн. приборы. 1979. № 9 (135). С. 34—42.
- [3] Божков В. Г., Малаховский О. Ю. // Изв. вузов СССР. Физика. 1981. № 1. С. 91—100.
- [4] Вяткин А. П., Максимова Н. К., Филонов Н. Г. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 6. С. 1147—1148.
- [5] Божков В. Г., Малаховский О. Ю. // Изв. вузов СССР. Физика. 1986. № 10. С. 87—93.
- [6] Вяткин А. П., Максимова Н. К., Панова Н. М. и др. // Изв. вузов СССР. Физика. 1981. № 4. С. 3—7.
- [7] Вяткин А. П., Максимова Н. К., Филонов Н. Г. // Деп. ВИНТИ АН СССР. М., 1988. № 6498.
- [8] Полякова А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. М., 1979. 167 с.
- [9] Вяткин А. П., Максимова Н. К., Филонов Н. Г. // ФТП. 1978. Т. 2. В. 7. С. 1384—1387.
- [10] Вяткин А. П., Максимова Н. К. // Изв. вузов СССР. Физика. 1983. № 10. С. 96—108.
- [11] Мильвидский М. Г., Освецкий В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М., 1984. 256 с.

- [12] Повстанко Ю. З. // ДАН УССР. Сер. А. 1988. № 9. С. 35—38.
- [13] Вяткин А. П., Кравцов В. И., Максимова Н. К. и др. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводн. приборы. 1988. № 1 (192). С. 80—84.
- [14] Алексеева З. М., Вяткин А. П., Криворотов Н. П. и др. // Изв. вузов СССР. Физика. 1987. № 8. С. 84—88.
- [15] Shenel K., Eglash S. J., Dutton R. W. et al. // IEEE Electron. Dev. Lett. 1984. V. ED25, N 8. P. 329—332.

Сибирский физико-технический институт
им. В. Д. Кузнецова при ТГУ
Томск

Получена 9.03.1989
Принята к печати 1.09.1989