

**НОВЫЙ УРОВЕНЬ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНТАКТОВ  
МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК, РЕАЛИЗОВАННЫЙ НА p-Ge.**

**М.М.Андреасян, А.М.Минасян, М.В.Минасян**

На германии p-типа выявлены участки N-ВАХ при обеих полярностях напряжения смещения МП-контактов и средних давлениях в них порядка  $10^8$  Па. Температурные условия комнатные. Достижение N-образности ВАХ индицируется повышенным уровнем тензочувствительности тока и его вступлением в характерный генерационный режим.

Барические изменения собственной проводимости и изменения в структуре зон вызывали интерес в контексте материаловедения и теории полупроводников еще до появления технологии p-n-переходов [1-3]. Было установлено, что в системе энергетических уровней кристаллической решетки типа алмаза ширина запрещенной зоны  $E_g$  между валентной зоной и зонами проводимости претерпевает определенные изменения с уменьшением межатомных расстояний. К примеру, для монокристаллического германия всестороннее объемное сжатие увеличивает энергетический разрыв между потолком валентной зоны и нижней зоной проводимости [4], хотя оказалось, что это утверждение следует отнести к области умеренных давлений и может смениться на обратное, если сжатие будет сильно увеличено [5]. Ниже, посредством рис.1, иллюстрирован ход изменения  $E_g$  для Ge и Si для области давлений 0—100 кбар [5,6]. Начальный рост  $E_g$  в случае германия происходит с крутизной  $7.5 \cdot 10^{-3}$  эВ.кбар<sup>-1</sup>, в то время как в Si имеет место уменьшение  $E_g$  с крутизной  $2 \cdot 10^{-3}$  эВ.кбар<sup>-1</sup>. В области  $P_1 \sim 50$  кбар рост  $E_g$  германия приостанавливается и при более высоких значениях давления наблюдается спад с такой же крутизной, как в Si.

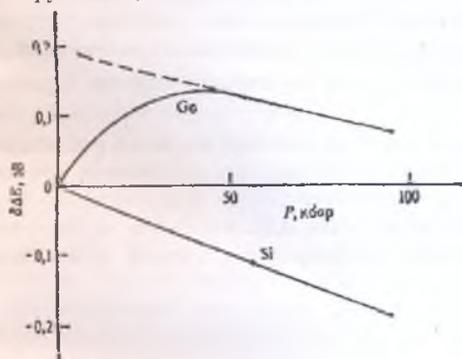


Рис.1. Изменение ширины  $E_g$  запрещенной зоны Ge и Si в зависимости от гидростатического давления  $P$ ;  $1 \text{ кбар} = 0.1 \text{ ГПа}$  [5].

Обрисованная картина обусловлена различным поведением минимумов при  $\vec{k} = 0$  и в направлениях  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ , что было обнаружено в затруднительных экспериментальных условиях высокого гидростатического давления, а само измерение изменений  $E_g$  (путем прослеживания собственной проводимости) требовало относительно высоких температур. Даже пример узкозонного InSb в этом отношении показателен: Кейс [7] показал, что при 85°C увеличение гидростатического давления в пределах от нуля до 12 кбар приводит к быстрому падению электропроводности образца p- InSb ( $N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), в то время как при 0°C она остается почти постоянной. Это показывает, что при 85°C и нулевом давлении проводимость является собственной, так что изменение ее большей частью обусловлено изменением  $E_g$  при изменении давления, тогда как при 0°C проводимость оказывается примесной и обусловленной в основном наличием ионизированных акцепторов [6].

На альтернативную возможность, упрощающую экспериментальные условия, указал Шокли [3], исходя из создаваемой теории p-n-переходов: сопротивление перехода должно сильно

зависеть от  $E_g$  и, следовательно, от давления даже при комнатной температуре. Экспериментальной проверке этого положения собственно и была посвящена работа [4]. За нею последовало много других исследований, отчасти имевших прикладные цели.

Практический выход подобных исследований сводится к обнаружению высоких и стабильных показателей  $\left(\frac{\Delta I}{\Delta P}\right)_{U,T}$  или  $\left(\frac{\Delta I}{\Delta F}\right)_{U,T}$ , т.е. подходящего параметра, характеризующего

тензочувствительность. Последняя форма записи, а именно  $\left(\frac{\Delta I}{\Delta F}\right)_{U,T=const}$ , предполагает, что

давление прикладывается к структуре (р-п-переходу, Шоттки контакту и т.д.), путем местного силового нагружения при фиксированных электрическом смещении и температуре. Пример так называемого локального придавливания мы приводим на рис.2, следуя работе [8].

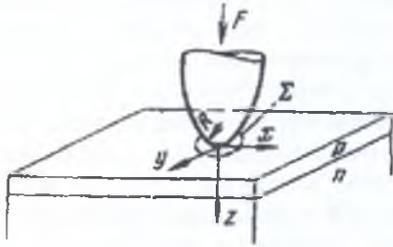


Рис.2. Локальное придавливание р-п-перехода под полусферическим кончиком металлического индентора [8].

Ранние исследования характеристик р-п- переходов под локальным давлением обобщены в [9,10]. Чувствительности токов к механическим усилиям и технологии их достижения, раскрываемые в этих работах, могли быть легко переняты и использованы при приборных реализациях. Но практика тензоэффектов в дальнейшем обогатилась, были раскрыты новые возможности.

В работах [11-13], посвященных условиям токопрохождения в так называемых прижимных германиевых диодах, сообщалось о появлении необыкновенно высокой тензочувствительности. Она достигается при сильной локализации поля механических напряжений в приповерхностной области полупроводника, приводящей к N-образности обратных ВАХ диодов с высокоомной базой n-типа. Диапазон давлений, обеспечивающих отрицательное дифференциальное сопротивление, невелик, но предельно высоко среднее значение механических напряжений на контакте:  $P_{ср} \approx (5 \div 6) \cdot 10^9$  Па. Считается, что при нем все еще сохранен упругий характер вызываемых деформаций.

Если последовательно с диодом в цепи задействована активная нагрузка, то для реализации высокой тензочувствительности не требуется обязательного прохождения нагрузочных прямых через области ОДП на ветвях ВАХ. Для датчиков механического усилия измерительного типа даже более удобно, чтобы нагрузочные прямые пересекали ветви ВАХ в областях «плато», как это иллюстрировано на рис.3. При регистрации малого вибрационного сигнала нелинейные искажения окажутся минимальны.

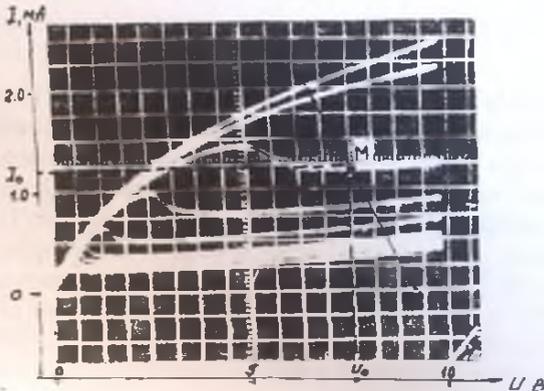


Рис.3. Ход обратных ВАХ и положение нагрузочной прямой. Рабочая точка  $M(U_0, I_0)$  выбрана в области плато. Отдельной ветви соответствует фиксированное значение силы  $F_1$ .

При работе с подобными диодами, нами зарегистрированы как  $I(U)$  семейства N-образных обратных ВАХ, так и соответствующие  $I(F)_L$  сила-токовые характеристики. В подходящей области сил крутизна последних могла превышать 1мА/сН (кривая 4 на рис.4).

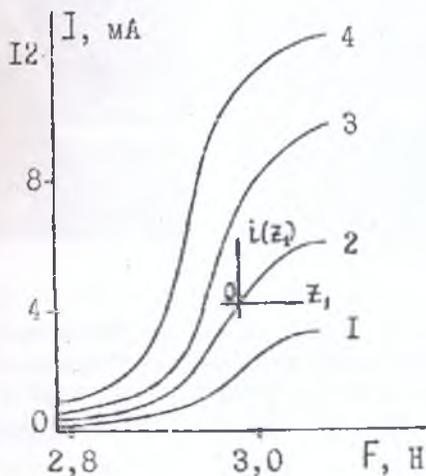


Рис.4.  $I(F)$  характеристики прижимного диода с неоднородной базой при фиксированных напряжениях смещения, равных: 1-5В, 2-10В, 3-15В, 4-20В.

В данной работе наша цель – проиллюстрировать достигаемый уровень тензочувствительности тока в присутствии N-образных участков на ВАХ, по мере перевода рабочей точки (точка М, рис.3) в направлении все увеличивающихся напряжений смещения, т.е. на всем участке смещений – от области появления ОДП на данной ветви ВАХ и до достижения пробойной области. Вообще говоря, мы не исключаем в этом смысле и области ограниченных пробоев, а также другие области, потенциально допускающие нарастание флуктуаций.

Индикация требуемого уровня тензочувствительности будет отражена в появлении автоколебаний тока, в предположении, что в диоде, имеющем акустическую колебательную степень свободы, может быть достигнута необходимая для этого компенсация механических потерь. При заданном среднем смещении  $U_0$ , модуляция тока диода, происходящая в такт с некоторым механическим (акустическим) возмущением, будет сопровождаться также модуляцией мощности, отбираемой от источника. Не вдаваясь в детали преобразований, можно ожидать, что это принесет в акустическую степень свободы либо дополнительный декремент, либо инкремент, тем большие, чем сильнее тензочувствительность. Затухание начального акустического возмущения, вполне естественное для обесточенного диода, в данном случае, благодаря подпитке от источника тока, может смениться усилением. А достижение стационарных автоколебаний будет обеспечено подходящей фазой и интенсивностью энергопоступлений [14]. Это означает, что, вообще говоря, критичны и знак, и уровень тензочувствительности, а искусственное понижение добротности диодной системы потребует более высокого уровня тензочувствительности. В случае недостижимости требуемого нового уровня, конечно, самовозбуждение невозможно.

Для иллюстрации последних утверждений можно сослаться на рис.5,6, полученные при исследовании зарождающихся вибросмещений небольшой по размерам стальной консоли, через которую осуществлялся прижим германиевого диода. В нем базовым кристаллом служит ГЭС-1,  $\langle 111 \rangle$ .

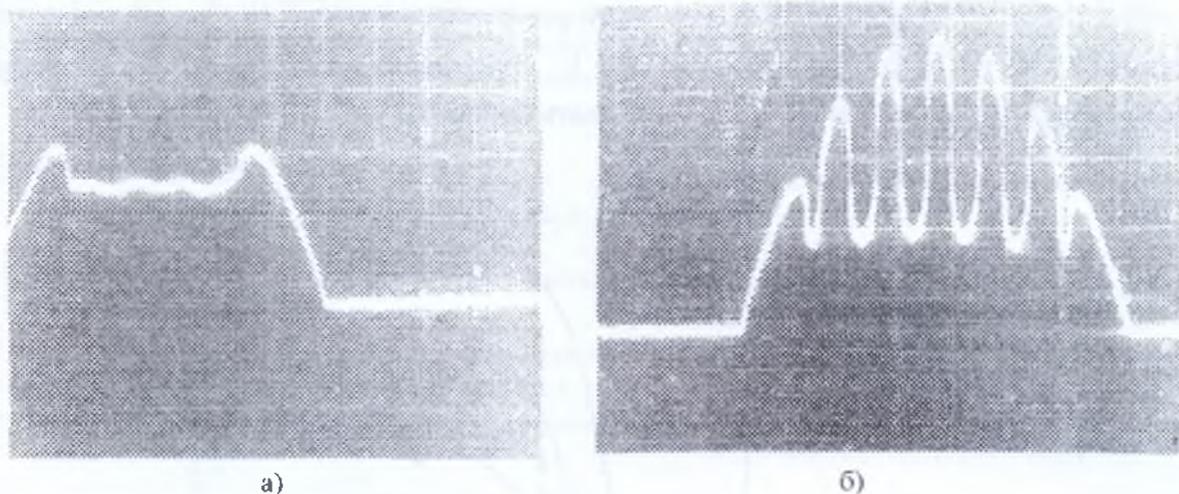


Рис. 5, а, б. Осциллограммы тока германиевого прижимного диода при запирающем полусинусоидальном импульсе напряжения. Обеспечены необходимый статический прижим и амплитуды импульсного напряжения, пороговые для зарождения осцилляций на плато обратного тока (срединные участки осциллограмм).

Ниже, в случае рис. 6, акустическая добротность предыдущей системы понижена из-за нагружающего диод звукоснимателя в канале непосредственной записи вибросмещений (второй луч осциллографа).

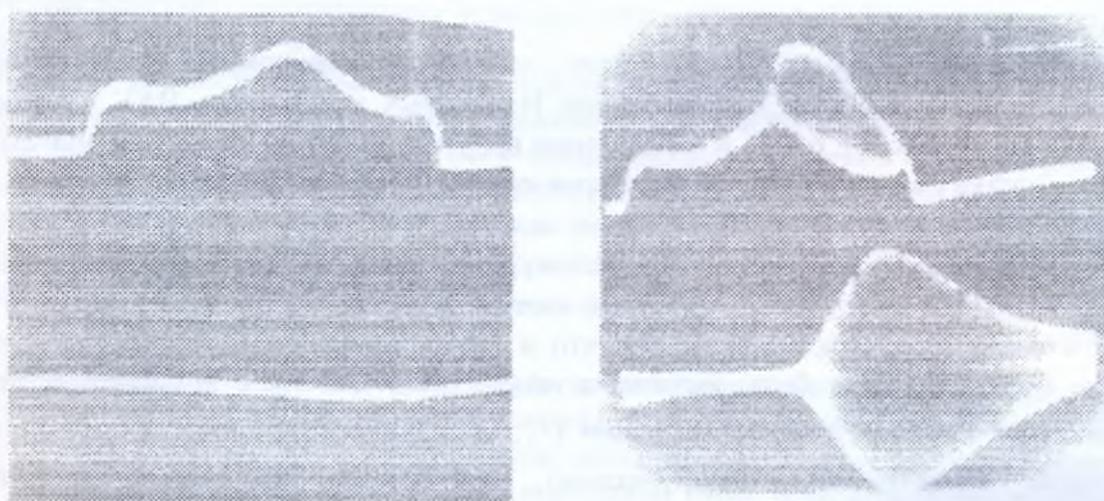


Рис. 6. Ток диода (верхний луч) и сигнал вибросмещений (нижний луч) при полусинусоидальном (запирающем) импульсе напряжения, с амплитудой, близкой к пробойной [14].

Новые условия привели к тому, что инкремент появляется лишь по достижении предпробойных смещений, где велико не только  $U_0$ , но, по-видимому, и  $(\Delta/\Delta F)_{\text{кр}}$ , т.е. значение чувствительности обратного тока диода к механическому усилию в контакте.

Конечно, тензочувствительности диодов в среднем больше при больших напряжениях (что согласуется с рис. 3), но зарождение колебаний в случае рис. 6 могло быть стимулировано еще и близостью пробоя, из-за флуктуационных особенностей такого режима.

К области пробоя имеют отношение и иллюстрации рис. 7, показывающие, что характеристики германиевого прижимного диода необычны и в области больших запирающих напряжений. Говоря о возможном задействовании области ограниченных пробоев, мы подразумеваем именно область восходящих значений токов, быстро (т.е. при небольшом приращении напряжения), переходящих в насыщение.

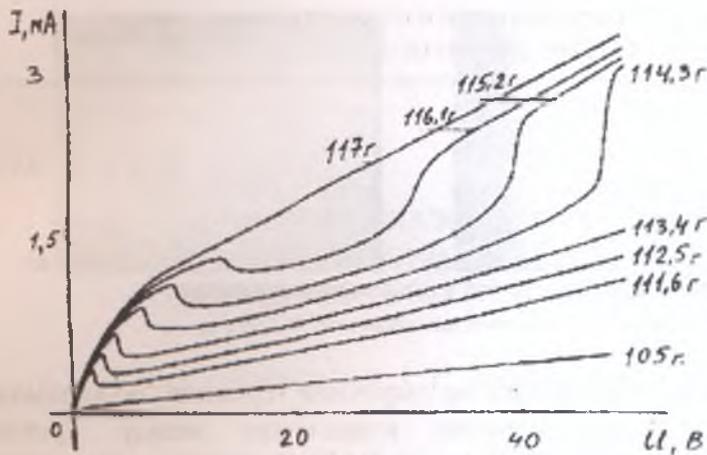


Рис. 7. Семейство обратных вольтамперных характеристик прижимного диода на кристалле германия марки ГЭС-10. Радиус закругления стального индентора в области контакта с кристаллом около 70 мкм. Температура 25°C. Цифры на кривых обозначают силы прижима [15].

Выше мы всюду имели дело с диодами на кристаллах германия электронной проводимости ( $N_D \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), испытываемых при  $T_0 \sim 300 \text{ К}$ . Что же касается аналогичных диодов с базовыми кристаллами р-типа, то для них ранее уже были известны сходные обратные характеристики, но с более слабым насыщением. В работе [16], откуда заимствованы данные рис. 8, утверждается, что такие характеристики наблюдаются (в отличие от структур на p-Ge) в области значительно больших токов, а стабильность их относительно низка.

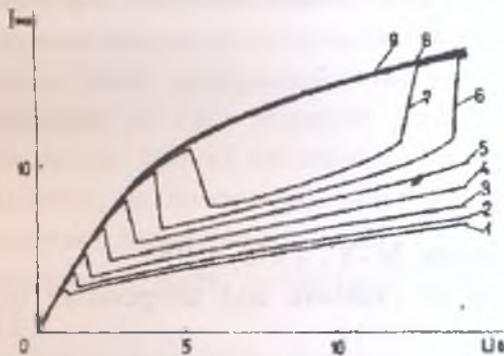


Рис. 8. Семейство обратных ВАХ прижимного диода на ГДГ-5 при силах прижима: 1-266.2, 2-269.3, 3-272.6, 4-274, 5-276.4, 6-277.5, 7-278.6, 8-279.7, 9-280.8 гр [16].

Сохраняя оговоренный выше подход к оценке достижимых тензочувствительностей, и в случае p-Ge мы снова заинтересовались возможностью реализации акустоэлектрических осцилляций. Рис 9 иллюстрирует полученную нами ВАХ обратносмещенного МП контакта на кристалле ГДГ-1 <111> в области относительно малых токов. Видно, что на заснятой ветви присутствует слабовыраженная N-образность (а, б), и одновременно стали возможны автоколебания (в, г). Как и в предыдущих подобных случаях, их период практически нечувствителен к электрическим параметрам цепи.

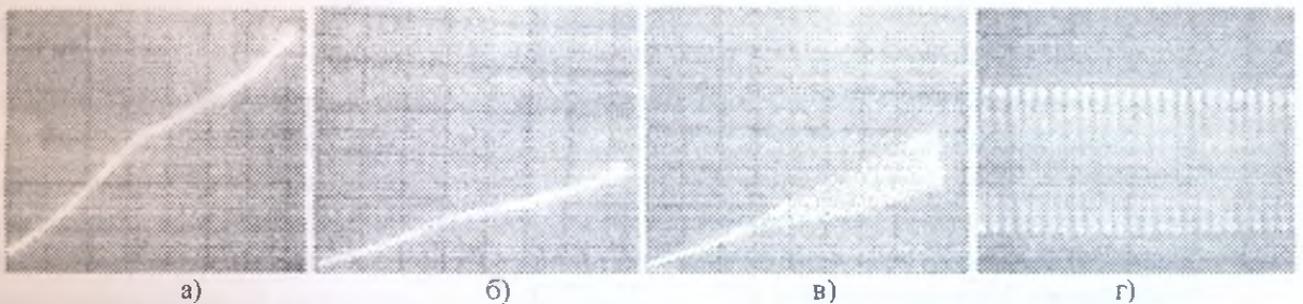


Рис. 9.  $I - V$  характеристики с ОДП N-типа на обратной ветви. Цена деления по горизонтали 1В, по вертикали—1мА для (а) и 2мА для (б, в). База—Ge, ГДГ-1 <111>. В случае осциллограммы (г) питание подается от источника постоянного тока.

Меняя полярность напряжения, т.е. переходя на прямую ветвь, для дырочного же Ge мы снова зафиксировали ВАХ со слабовыраженной N-образностью и осцилляциями (рис. 10), имеющими уже упомянутый характер.



Рис. 10. Прямые ВАХ прижимного диода с базой из дырочного германия ( $I_{\text{ДП}} = 5 < 111 >$ ) и самовозбуждение колебаний на частоте  $\approx 330$  Гц.

Подобные характеристики при прямых смещениях на дырочном германии, по-видимому, выявлены впервые. Они раскрывают определенную корреляцию между уровнем тензочувствительности структуры и присутствием ОДП на ее ВАХ. А именно, при разных проводимостях базовых кристаллов и при смене полярностей смещений, нами обнаружены не только N-образные участки на ВАХ, но и осцилляции тока, возможные лишь при высоких уровнях тензочувствительности.

#### Ամփոփում

Գերմանիումի p-տիպի վրա սենյակային ջերմաստիճանում բացահայտված են ՎԱՀ-երի N-տեղամասերի ուղիղ և հակառակ շերտի յարդամների և  $10^8$  Պա կարգի տեղային ճնշումների տակ: ՎԱՀ-երի բերումը N-տեսքի հնարավոր է դարձնում հոսանքի թնդողգայունության ավելի բարձր մակարդակի և նոր՝ ինքնատատանողական պրոցեսի դիտում:

#### Լիտերատուրա

1. Miller P., Teylor J. Phys. Rev., 76, 179(1949).
2. Teylor J. Phys. Rev., 80, 919(1950).
3. Shockley W., Electrons and holes in semiconductors, N.-Y., 1950, p.309.
4. Hall H., Bardeen J., Pearson G., The effects of pressure and temperature on the resistance of p-n-junction in Ge, Phys. Rev., 84, 129(1951).
5. Slykhouse T.E., Drickamer H.G., Journ, Phys. Chem. Solids, 7, 210(1958).
6. Смит Р., Полупроводники, М., Мир, 1982, с. 508.
7. Keyes R.W. Phys. Rev., 99, 490(1955).
8. Полякова А.Л., Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов, М., Энергия, 1979, с.97.
9. Rindner W. Resistance of elastically deformed shallow p-n-junction. J. Appl. Phys., 33, 8, (1962).
10. Wortman J.J., Hansen J.R., Burger R.M., Effect of mechanical stress on p-n-junction devices characteristics, J. Appl. Phys, 35, 2122 (1964).
11. Меликян Э.Г., Точечный германиевый диод с отрицательным сопротивлением N-типа, Радиотехника и электроника, 12, 1521, 1967.
12. Меликян Э.Г., Кечиев О.М., Высокочувствительный механоэлектрический преобразователь на германиевом локально-деформированном диоде, Метрология, 11,32 (1979).
13. Меликян Э.Г., О тензочувствительности локально деформированных неоднородных полупроводниковых структур, ФТП, 19, 913, 1985.
14. Минасян М.В. К природе акустоэлектрической неустойчивости в германиевом тензодиоде, Ученые записки ЕГУ, 2, 82, 1980.
15. Меликян Э.Г., Саакян К.Г., Бабаян Г.Г., Саркисян Р.Ц., Чувствительный к давлению германиевый точечный диод. Арм. ИНТИ. Инф. листок № 396. Ереван, 1967.
16. Бабаян Г.Г., Меликян Э.Г., Зависимость свойств неоднородно деформированных германиевых диодов от кристаллографической ориентации, Арм. ИНТИ, Инф. листок № 402, Ереван, 1972.