

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՂՈՐԴՈՒՄ ՆԱՍՏԻՆԱԿԱՆ ՍՈՑԻԱԼԻԶՄԻ
НАУЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

ЕФИ—179(25)-(76)

Դ.Դ.ԲԱԲԱՅԱՆ, Վ.Ի.ՍԵՄԵՆՅԱԿ, Յ.Ա.ԳՈԼՈՒԲԵՎ,
Տ.Դ.ԱՏԱՏՐՅԱՆ, Ե.Տ.ԴՈԲՐՅՈՒՆԻՆԱ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТАКТА
СФЕРИЧЕСКИЙ ИНДЕНТОР-ПОЛУПРОВОДНИК НА
РАСТРОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ
1976
ԵՐԵՎԱՆ



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Научное сообщение ЕФИ-179(25)-(76)

Г.Г.БАБАЯН, В.И.ПЕТРОВ^{х)}, Ю.А.ГОЛУБЕВ^{х)},
С.Г.АСАТРЯН, Е.С.ДОБРЫНИНА^{х)}

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТАКТА
СФЕРИЧЕСКИЙ ИНДЕНТОР-ПОЛУПРОВОДНИК НА
РАСТРОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

х) Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Ереван 1976

Ереванский Физический
ИНСТИТУТ
Зал преприатов.

© Ереванский физический институт, 1976

Неоднородное или одноосное давление, приложенное к полупроводнику, приводит к интересным эффектам. Одним из этих эффектов является изменение тока р-п перехода или Шоттки диода под влиянием давления [1].

При высоких локальных давлениях обратный ток диода настолько чувствителен к малейшему изменению внешней силы, что позволяет использовать этот эффект в создании различных механоэлектрических преобразователей [1]. В этих исследованиях давление под индентором составляет $10^3 - 7 \cdot 10^4$ кг/см², естественно, возникает вопрос исследования, помимо физических аспектов явлений, механических свойств локально деформированной области полупроводника. Такие исследования проводились с целью выявления пластической деформации, генерации дислокаций, дефектов, трещин и т.д. [2-9,11].

В работе [6] получены уравнения полного поля механических напряжений, создаваемого сдвинутой областью сферического индентора на полупроводник с решеткой типа "алмаз". Приводятся линии механических напряжений по различным кристаллографическим направлениям. Отмечается, что при высоких значениях давления под индентором возникают трещины, известные как трещины Герца.

В работах [12-14] было обнаружено, что при локальном давлении иглой на германиевые диодные структуры (р-п переход, Шоттки диод или прижимной контакт металл-полупроводник) при определенном "пороговом" значении силы прижима на сферический индентор на об-

ратной ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) около начала координат, появляется участок с отрицательным сопротивлением (ОС) N' -типа. При определенной "граничной" силе прижима ($F_{гр}$ рис.1) область ОС исчезает. Разность между пороговой и граничной силами очень мала и составляет 2-5% от порогового значения силы. Среднее давление под иглой при этом составляет $6 - 7 \cdot 10^4$ кг/см². Представляет интерес исследование механических свойств контакта индентор-германий при таких высоких значениях локального давления, а также исследование свойств контакта индентор-кремний при средних значениях давления до 10 кг/см². Среднее давление под сферическим индентором вычисляется с помощью формулы согласно [10]

$$P_{cp} = \frac{F^{1/3}}{9R^{2/3} \left[\frac{3}{4} \left(\frac{1-\epsilon^2}{E} - \frac{1-\epsilon'^2}{E'} \right) \right]^{2/3}},$$

где F - сила прижима, R - радиус кривизны индентора, ϵ , E и ϵ' , E' - коэффициенты Пуассона и модули Юнга полупроводника и материала индентора, с точностью 3-5%.

По нашим литературным данным отсутствуют экспериментальные работы по указанному вопросу.

Было проведено исследование отпечатков инденторов из корунда, твердого сплава ВК6М и стали на поверхности монокристаллов германия и кремния в зависимости от радиуса закругления инденторов, кристаллографической ориентации и типа проводимости.

В качестве индентора использовались иглы из корунда, твердого сплава ВК6М и из стали с радиусом закругления кончика 30-150 мкм. С целью уменьшения механических микронапряженностей на соприкасающихся поверхностях индентора и кристалла, поверхности обрабатывались самым тщательным образом субмикронными алмазными пастами, минимальная величина зерен которых 0,1 мкм.

Образцы изготавливались из бездислокационного германия и кремния марки ГЭС, ГДГ, КЭФ и КДБ с плотностью дислокаций меньше чем 10см^{-2} . Плоскости $\{111\}$, $\{110\}$ и $\{100\}$ вырезались из одного слитка. Ориентация слитков по кристаллографической плоскости $\{111\}$ определена рентгеновским аппаратом УРС-50И, а ориентация по $\{110\}$ и $\{100\}$ направлениям - фотографическим методом. После шлифовки поверхности образцов полировались алмазными субмикронными пастами с последующим уменьшением зерен до величины 0,1 мкм. Германиевые образцы травились в йодном травителе [16], а кремниевые в СР-8.

Необходимая сила прижима на индентор создавалась с помощью рычажной установки [14], значение силы изменялось от 2 до 600 г в зависимости от радиуса закругления иглы. Для определения значения $F_{гр}$ были сняты обратные ВАХ германиевых диодных структур в зависимости от силы прижима (пъезодиодов) на двухкоординатном самописце ПДС-021. Характерный график для пьезодиодов на основе p - n перехода показан на рис.1. После определения $F_{гр}$ индентор нагружается рядом сил прижима через определенный интервал (например, для корунда по 10 г), так, чтобы минимальное и максимальное значение составляло 20-30% от $F_{гр}$. Для кремния значения сил прижима на индентор, для разных радиусов закругления, определяем из формулы (1) так, чтобы среднее давление под индентором составляло $7 \cdot 10^4$ кг/см² - $3 \cdot 10^5$ кг/см².

Исследования проводились на растровом электронном микроскопе (РЭМ) марки JSM-50A.

До погружения индентора на образец с увеличением 12000 были сфотографированы полированная и травленная поверхности германия и кремния для различных ориентаций, удельных сопротивлений и типа проводимости. На рис.2 показана типичная микрофотография полированной поверхности бездислокационного германия марки ГЭС-1 для кристаллографического направления $\{111\}$. Разрушенный слой минимален для направления $\{111\}$, максимален для $\langle 110 \rangle$. Этот результат совпадает с результатами,

полученными в работе [17] и является характерным для исследуемых образцов. На травленных образцах разрушенный слой отсутствует.

Исследования показали, что на германиевых образцах обоих типов проводимости для сил прижима выше $F_{гр}$ на 20% отпечатков не обнаружено, кроме направления $\{110\}$. Выше этого значения получается отпечаток в виде кратера, показанный на рис.3. Как видно, трещины идут вглубь кристалла по кругу, т.е. по краю сдавленной области. Внутри кратера видны следы разрушения, по-видимому, они образуются за счет внутренних остаточных упругих напряжений, которые остаются после плавного снятия нагрузки с индентора.

Для плоскости $\{110\}$, полученные результаты сильно отличаются друг от друга. Такой результат можно было ожидать, так как направления $\{110\}$ являются главными кристаллографическими направлениями скольжения в германии. С уменьшением удельного сопротивления германия отпечаток становится отчетливым при значениях $F_{гр}$. Несколько неожиданно то, что для игл с большими радиусами закругления, отпечаток получается при малых значениях силы прижима (имеется ввиду по сравнению $F_{гр}$), хотя предполагалось, что на острых должно быть наоборот. Этот результат, по-видимому, связан с тем, что вероятность захвата области с микронеровностями и различными типами дефектов (дислокации, микротрещины и т.д.) становится большей по сравнению с отпечатками от игл с малыми закруглениями. Для стальных игл отпечаток получается гладким, т.е. происходит некоторая пластическая деформация стали как более "мягкой" по сравнению с твердым сплавом и корундом, что и сглаживает механические напряжения на неровностях сдавленных поверхностей. Можно предположить, что образуются микротрещины Герца [8], которые генерируются с увеличением силы прижима на индентор. Приведенные здесь результаты наших исследований показывают, что, по крайней мере, они становятся опасными за граничной силой при-

жима. Однако для корундовых игл на некоторых образцах германия заметны следы отпечатка при значениях граничной силы (рис.4).

Для кремния интерпретация экспериментальных результатов в области высоких давлений усложняется, хотя до давления 10^5 кг/см² отпечатки (разрушения) не обнаруживаются. Это связано с двумя причинами: во-первых, наличием твердого хрупкого слоя SiO_2 , который как-то задерживает реакцию объема твердого тела; во-вторых, на кремнии не наблюдается эффект ОС, который служит для германия началом отсчета (имеется ввиду $F_{гр}$). Здесь мы предполагаем, что этот эффект начинает проявляться при определенном значении давления.

На основании наших опытов можно утверждать, что в области давлений до $8 \cdot 10^4$ кг/см², под которым исследуются кремниевые полупроводниковые приборы [1], никаких разрушений в виде отпечатков не обнаружено.

Как известно [11], касательные напряжения имеют максимальные значения у краев контакта и идут под углом 45° вглубь кристалла (с учетом анизотропии этот угол, по-видимому, может изменяться). Эти напряжения и образуют трещины. Тот факт, что под индентором около поверхности кристалла примерно 80% давления имеет гидростатический характер, является той благоприятной причиной, что полупроводник (германий, кремний) выдерживает столь высокие значения давлений — до 10^5 кг/см² не подвергаясь разрушению. Гипотеза максимальных касательных напряжений при всестороннем давлении не приводит к возникновению разрушающего состояния, что, в частности, и доказывают исследования влияния локального давления на ВАХ диодов [13]. Необратимые явления возникают далеко за пределами закона Гука, для германия оно составляет $4,4 \cdot 10^4$ кг/см² [15]. Можно предположить, что в нашем случае разрушение происходит при таких значениях деформации, с которых снята упругая всесторонняя деформация. Здесь мы не

рассматриваем кинетические аспекты разрушения. Однако, так как мы проводим измерения на РЭМ после нагружения, то существует некоторая релаксация, которая существенно не может изменить картину отпечатка, поэтому при более микроскопических измерениях нужно учитывать этот фактор. Здесь также следует отметить, что время, за которое кристалл выдерживает механические напряжения до его разрушения, является одним из важных параметров в кинетической теории прочности [18]

Так как мы рассматриваем механические аспекты эффекта неоднородного давления на полупроводниковые приборы, то нужно учитывать какова роль протекающего тока через деформированную область. Судя по данным других авторов, роль электромеханического эффекта [19] существенно не изменит общую картину. Хотя в нашем случае сложный характер поля деформации анизотропного кристалла еще более осложнит картину переноса тока через деформированную область. Здесь может повлиять и та выделяемая мощность в виде температуры, которая может флуктуировать.

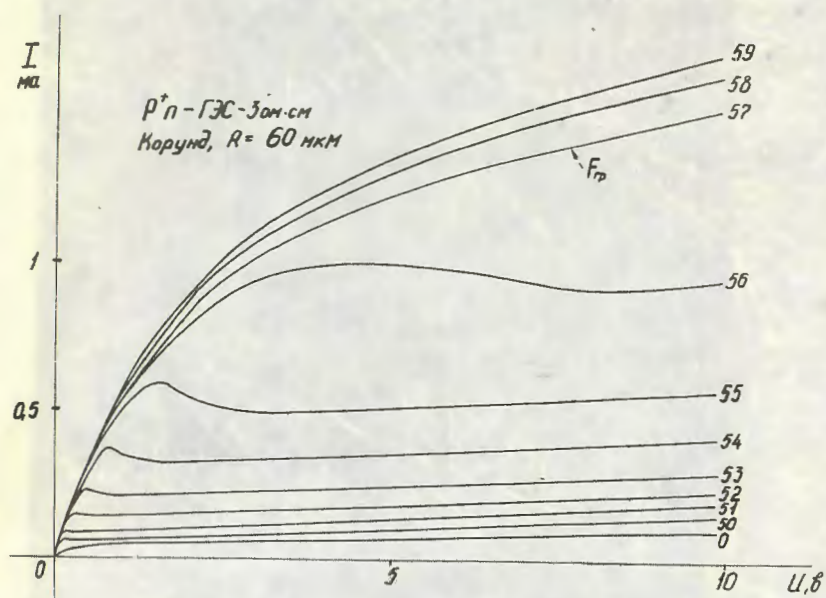


Рис.1 Семейство обратных вольтамперных характеристик германиевого пьезодиода. Цифры на кривых указывают величину силы прижима на индентор в граммах.

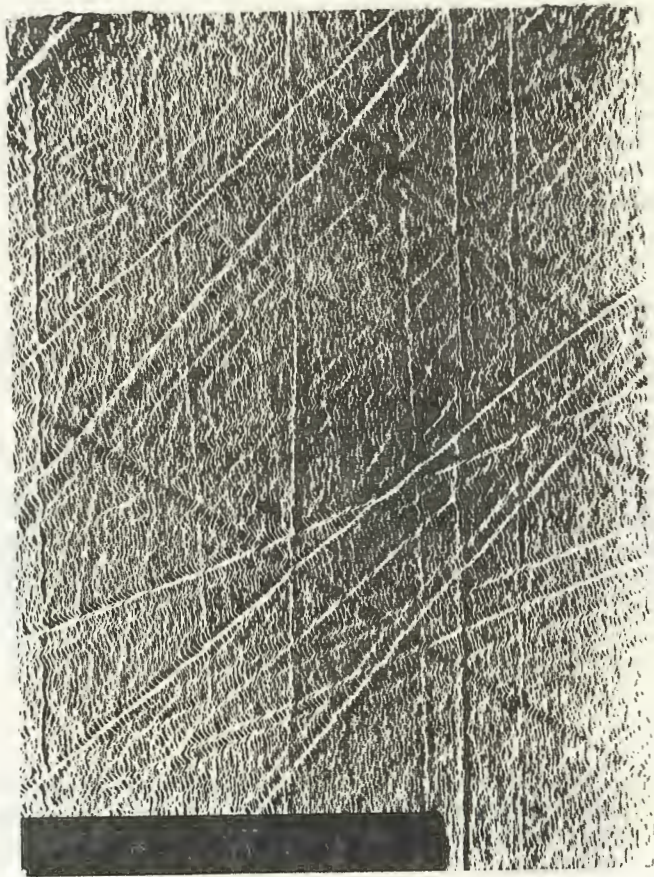


Рис.2 Микрофотография полированной поверхности бездислокационного германия (X 12000).

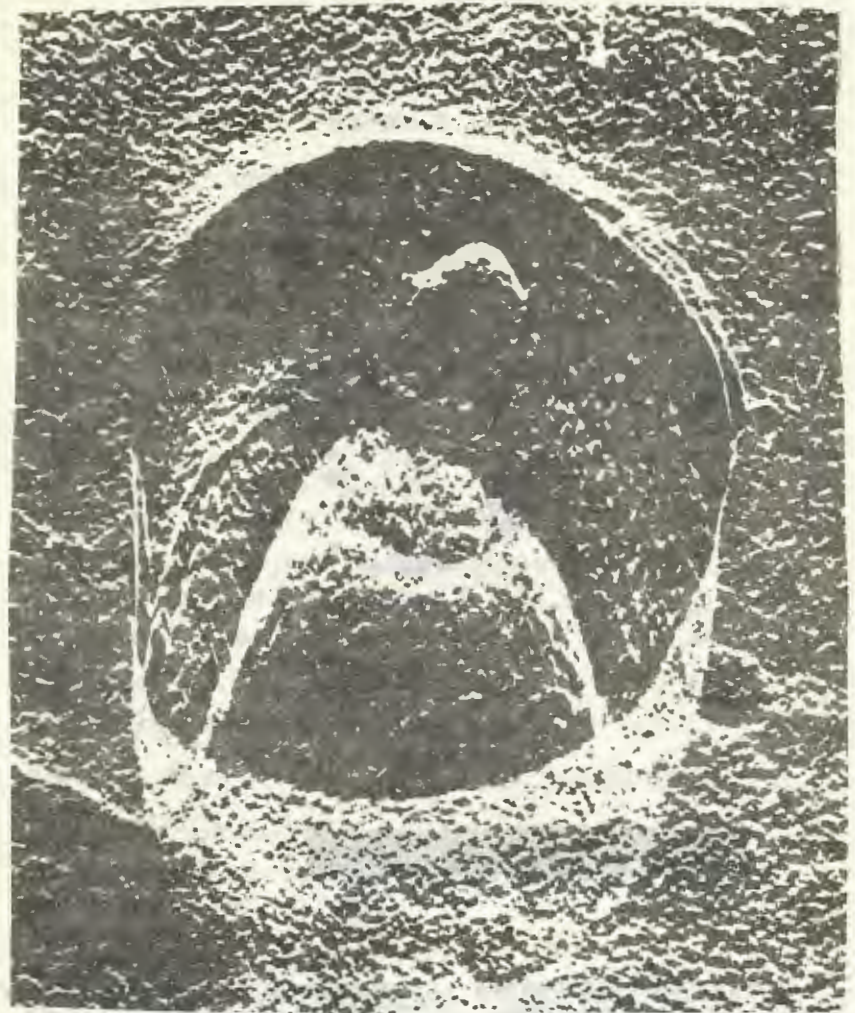


Рис.3 Микрофотография отпечатка на травленной поверхности германия (X 20000). Индентор из твердого сплава марки ВК6М.



Рис.4 Микрофотография отпечатка на травленной поверхности германия (X 2000). Индентор из корунда.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Л.Полякова. Акустический журнал, 1, 1, 1972.
2. W.Rindner and R.F.Trampsch. J. Appl. Phys. 34, 758, 1963
3. W.Rindner. J. Appl. Phys. 36, 2079, 1965.
4. O. Johnson. J. Appl. Phys. 37, N7, 2521, 1966.
5. В.П.Алехин и др. ДАН СССР, 188, 2, 326, 1969.
6. B. Lawn. J. Appl. Phys. 39, 10, 4828, 1969.
7. W.H. Macmillan. J. Appl. Phys., 41, 2, 672, 1970.
8. В.С.Постников и др. ФТТ, 10, 3080, 1972.
9. В.П.Алехин и др. сб. "Дефекты структуры в полупроводниках", Новосибирск, 142, 1973.
10. Л.Ландау, Е.Лифшиц. "Теория упругости", Москва, 1965.
11. G.M. Hamilton and L.E. Goodman. J. Appl. Mech., 33, N2, 1966.
12. Э.Г.Меликян и др. Инф. Листок Арм. ИНТИ, 396, 1967.
13. Э.Г.Меликян, Г.Г.Бабаян. ФТП, 2, 293, 1969.
14. Г.Г.Бабаян. Автореферат, ЕГУ, 1973.
15. R. Graham et al. J. Phys. Chem. Solids, 27, 1519, 1966.
16. Патент ВНР, №151775.
17. В.И.Голиков и др. Полупроводниковая техника и микроэлектроника, 13, 3, 1973.
18. В.Р.Регель и др. УФН, 106, 2, 193, 1972.
19. J.H. Westbrook and J.J. Gilman. J. Appl. Phys. 33, 7, 2360 1962.

Рукопись поступила 4-го июня 1976г.

Ереванский Физический
ИНСТИТУТ
Зал преприатов.

ՀԱՅԿԱՍՏԱՆԻ ԳՐԱԴԱՐԱՆ

Գրքերի ցանկ
1. Ա. Բրուսիլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
2. Մ. Կուկոլով և Ն. Բ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
3. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
4. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
5. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
6. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
7. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
8. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
9. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.
10. Մ. Կուկոլով, ճարտարագիտական դասընթաց, 1917 թ.

Ըրդակտոր Լ.Ս.Մուկայն
Թեխ.ըրդակտոր Ա.Տ.Աբրադյն

Ձակազ 672 ՎՓ-03976 Թրդադ 299
Սոդրսնո կ քեչոտր 3/1X-76դ. Փորմատ իզդոնոյո 30x40
1,0 սչ.նեզ.լ. Ս. 7 կ.

Օթքեչոտոնո նո ըոտոքրոնթե
Երեվոնսկոյո ֆոզոչեսկոյո ինստոտոյո, Երեվոն 36, քեր.Մար-
քորյոնո 2

