

УДК 621.328.2

ФИЗИКА

Член-корреспондент АН Армянской ССР Г. М. Авакьянц, А. А. Степанов,
 Р. С. Барсегян, С. П. Мовчан

Неоднородное протекание тока в кремниевых диодах, компенсированных кадмием и цинком

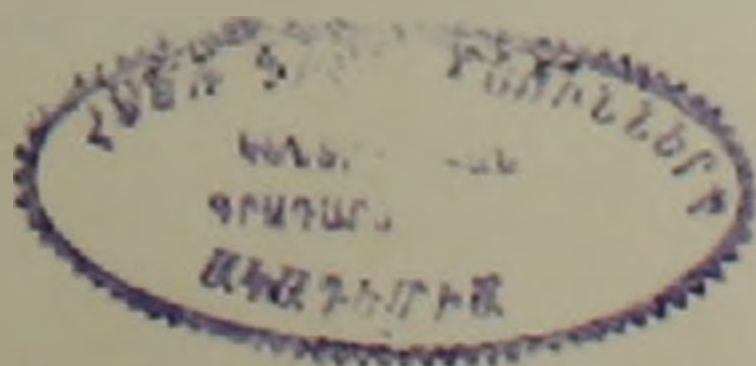
(Представлено 2/VI 1971)

Диоды, имеющие р-і-п-структуру и обладающие S-образной вольт-амперной характеристикой, проявляют ряд интересных свойств, одним из которых является эффект неоднородного распределения тока, протекающего в базе диода на участке отрицательного сопротивления. В этом случае ток проходит не по всей площади диода от р-п-перехода до тылового контакта, а только по довольно узкому каналу (образуется шнур тока), при этом плотность тока в шнуре довольно велика (20 а/см^2) ⁽¹⁾.

Диоды, обладающие такими свойствами, изучались в работах ⁽¹⁻⁶⁾. Токовые каналы наблюдались в диодах из GaAs при температуре жидкого азота ⁽¹⁾, а затем при комнатной температуре ⁽³⁾, причем наблюдение велось визуально, благодаря наличию рекомбинационного излучения, сопутствующего образованию шнура тока.

Метод подвижного светового зонда был успешно применен ^(5, 6) для определения местоположения и характеристик шнура тока в кремниевых и германиевых диодах с примесью золота. Световой зонд в ⁽⁵⁾ представлял собой узкую (80 мкм) световую полоску, которая перемещалась по базе диода (длина базы была от 2 мм и выше). С помощью такого зонда можно было довольно точно определить наибольшую ширину шнура тока, но определение формы шнура и его размеров по длине базы от р-п-перехода до тылового контакта не представлялось возможным. Такая возможность возникает при использовании светового зонда в виде круглого пятна. В работе ⁽⁷⁾ такой зонд использовался для выявления фоточувствительных областей в базе кремниевого диода с примесью кадмия, который имел р⁺-п-п⁺-структуру.

В настоящей работе исследовалось распределение фототока по базе диода при помощи светового зонда, представляющего собой круг диаметром 10 мкм. Источником света служил He—Ne лазер, интенсивность его излучения регулировалась нейтральными светофильтрами и подбиралась таким образом, чтобы световой зонд не влиял заметным образом



на величину тока, проходящего через диод. Исследуемые диоды были изготовлены из кремния *n*-типа с примесью кадмия ($10^{-2}\%$ Zn) и цинка и имели *p-i-n*-структуру с шириной базы до 300 мкм. Диод мог перемещаться двумя микрометрическими винтами во взаимоперпендикулярных направлениях, что было равноценно перемещению светового пятна по сошлифованной базе диода. Световое излучение, фокусируемое на диоде, модулировалось диском с отверстиями и сигнал фотоответа подавался на синхронный детектор с выходом на стрелочный прибор (вместо синхронного детектора можно было использовать избирательный низкочастотный усилитель).

Структуры исследовались в двух режимах работы. В первом случае диод работал как фотоэлемент при локальном освещении, в другом — на диод подавалось прямое смещение и изучалось распределение фотоответа при различных местоположениях рабочей точки диода на вольт-амперной характеристике.

1. Распределение фото эдс по базе диода из кремния с примесью кадмия имело неоднородный характер, что, вероятно, было результатом неравномерной компенсации полупроводникового материала. У большинства диодов максимум фотоответа наблюдался вблизи контактов и значительно реже — середине базы. Неоднородный характер распределения выражался в том, что в базе диода имелся участок с максимальной фоточувствительностью, который располагался между контактами и имел наибольшую ширину возле тылового контакта.

При подаче на диод прямого смещения характер распределения фотоответа по базе диода на участке положительного сопротивления качественно совпадал с распределением в случае работы диода без внешнего источника, т. е. в той области базы, где наблюдался максимум фото эдс, при наличии смещения обнаруживался максимум фотоответа. Таким образом, протекание тока через диод в значительной степени определяется характером распределения неоднородностей в базе диода. На рис. 1 показаны распределения фото эдс (1, а) и фототока (1, б) по базе одного из исследуемых диодов в зависимости от расстояния между контактами.

При наличии на диоде смещения все измерения проводились в режиме генератора тока, за исключением случая, когда изучался характер распределения в зависимости от сопротивления нагрузки. В этом случае оказалось, что в результате увеличения сопротивления нагрузки от $5 \cdot 10^2$ до $7 \cdot 10^5$ ом при постоянном напряжении и токе через диод величина фотоответа возрастала примерно в 10 раз, при этом также происходило незначительное увеличение фоточувствительной области.

На участке положительного сопротивления вольт-амперной характеристики распределение фотоответа по базе диода имеет выраженные максимумы. По мере увеличения тока до точки срыва, ширины этих участков базы увеличивается также, как и величина фотоответа (рис. 2, а). Если рассматривать, как изменяются размеры фоточувствительного участка в зависимости от расстояния между контактами, то оказывается, что у большинства диодов при наличии смещения наибольшая ширина фото-

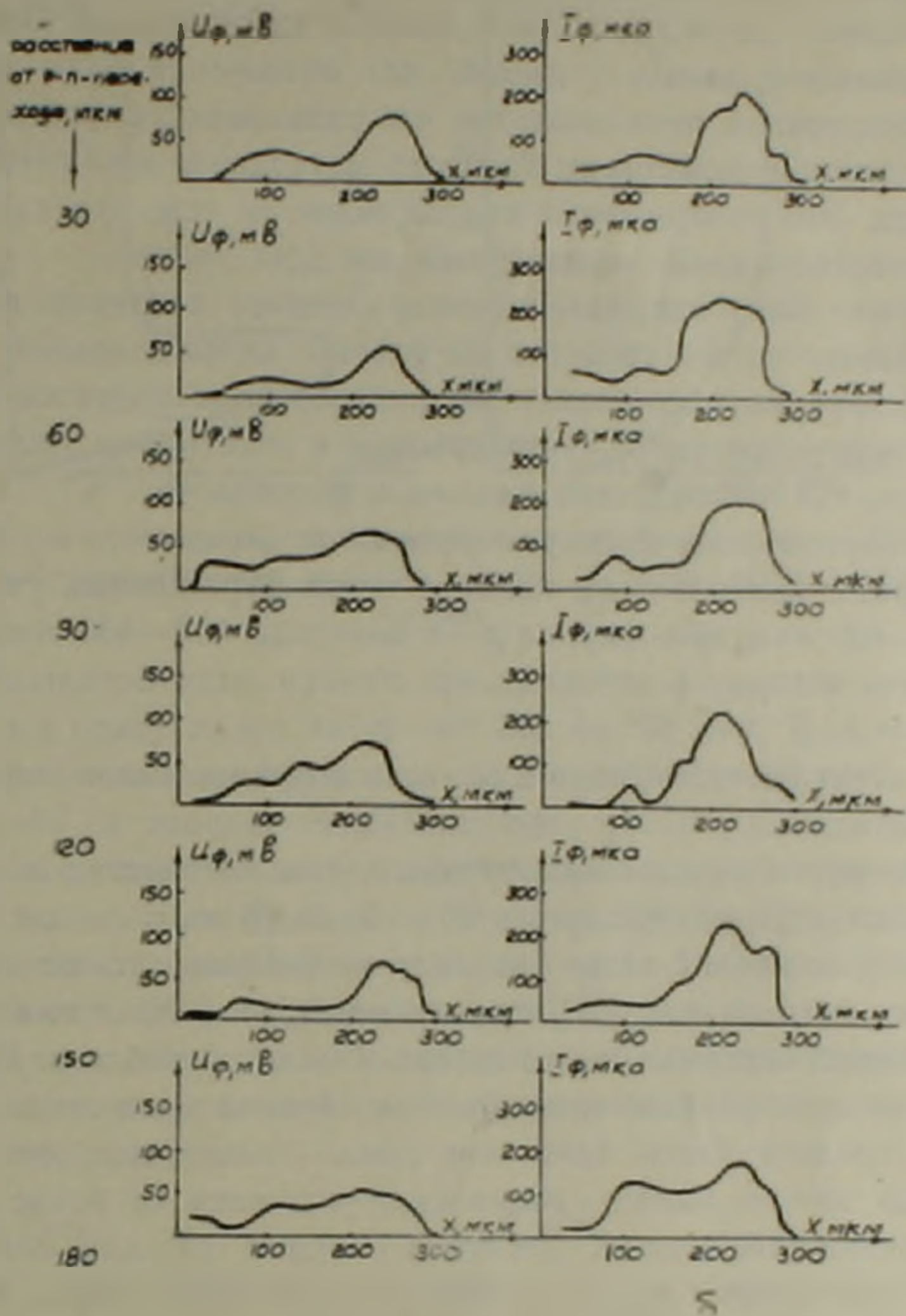


Рис. 1. Характер распределения фотоответа по базе диода: а—без смещения на диоде; б—при наличии смещения, на участке до срыва. Ось X параллельна плоскости контактов. Ширина базы диода 190 мм

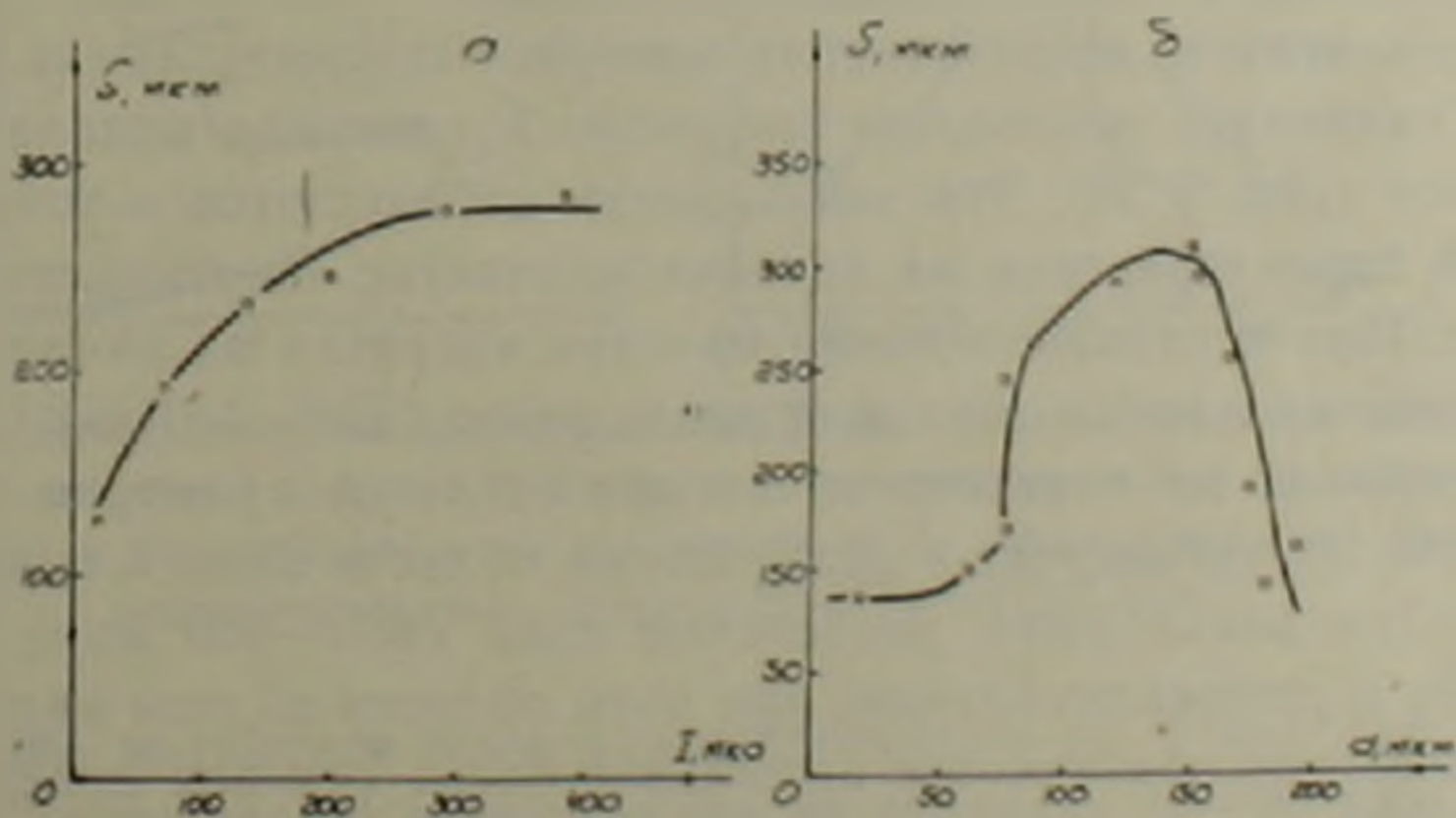


Рис. 2. а—зависимость ширины S фоточувствительного участка от тока I через диод до срыва. Ширина базы диода 280 мм; б—зависимость ширины S фоточувствительного участка от расстояния между контактами d . Ширина базы диода 210 мм

чувствительного участка наблюдается в средней части базы. Эта зависимость показана на рис. 2, б. Здесь следует заметить, что толщина слоя, которая ошлифовывалась у диодов для обнажения базы контролировалась с достаточной точностью, так что указанная зависимость определялась в основном свойствами базового материала, а не степенью шлифовки диода. Это соображение подтверждается тем, что такое распределение фотоответа было характерным для всех диодов.

Магнитное поле, направленное параллельно протекающему току в диоде, не влияет на его свойства на участке положительного сопротивления. Действие же поперечного магнитного поля сводится к незначительному увеличению напряжения срыва и к некоторому уширению (5—8%) области, где наблюдается максимум фотоответа.

Таким образом, изучение распределения фотоответа по базе диода до точки срыва указывает на наличие четко выраженных участков шириной 300—400 мкм при ширине $p-n$ -перехода 800—850 мкм, фоточувствительность которых в значительной степени выше остальной площади базы.

После переключения диода в область отрицательного сопротивления фоточувствительные участки уменьшались по ширине до 80—200 мкм и имели более резко выраженные границы, чем на участке до срыва, величина фотоответа уменьшалась в 10—15 раз. В этом случае фоточувствительность у остальной части базы или не наблюдалась совсем, или же была крайне незначительна. Весь ток через диод протекал как бы по каналу, который соединял $p-n$ -переход и тыловой контакт. Ширина канала на всей его протяженности была постоянна с некоторым увеличением ее в средней части базы или реже — после тылового контакта. У некоторых диодов канал начинался и кончался не возле контактов, а на расстоянии нескольких десятков микрон от них, или же он начинался на контактах, но на отдельных участках базы, где канал проходил, имелись области, в которых фоточувствительность была меньше, чем на остальных его участках. Эти факты скорее всего можно связать с тем, что канал имеет извилистую форму и на отдельных участках уходит в глубину базы от поверхности шлифа.

С увеличением сопротивления нагрузки ширина канала возрастает. Однако, начиная с некоторого значения R_n , ширина канала больше не изменяется (рис. 3, б). Эта зависимость наблюдается в точке А вольт-амперной характеристики на начальном участке «вертикали» сразу после срыва. При постоянном сопротивлении нагрузки на начальном участке «вертикали» в небольшом интервале токов (370—440 мка) (рис. 3, а), ширина канала на поверхности шлифа остается примерно постоянной, имея наибольшую ширину в центральной области базы и сужаясь к контактам. При дальнейшем увеличении тока (450—600 мка) появляется тенденция к уширению канала, при этом области вблизи контактов уширяются быстрее, чем участок в середине базы. Так для диода, вольт-амперная характеристика которого показана на рис. 3, а, при увеличении тока от 450 до 600 мка ширина канала у контактов увеличивается от 190

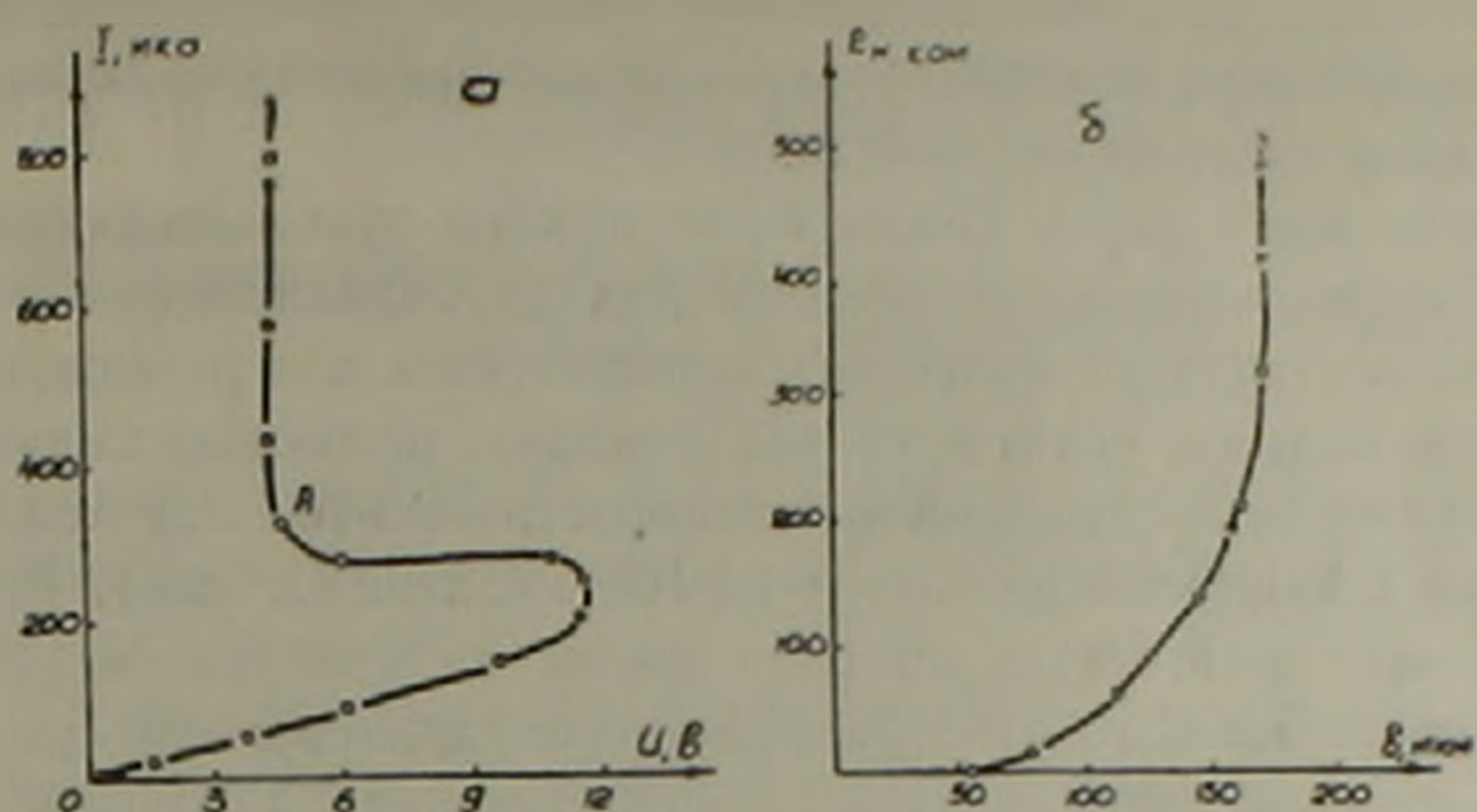


Рис. 3. а—вольт-амперная характеристика диода, б—зависимость ширины канала b от сопротивления нагрузки в точке А вольт-амперной характеристики

до 240 мкм, а в центральной части—от 230 до 260 мкм. Для токов выше 600 мкА уширение канала происходит заметно быстрее и равномерно по всей длине.

Один из исследуемых диодов имел вольт-амперную характеристику с двумя участками срыва (рис. 4, а). В этом случае в базе наблюдалось два канала, один из которых проявлял в 4 раза большую фоточувствительность и был на 25% шире, чем другой. На рис. 4, б показана зависимость ширины каждого из каналов от расстояния между контактами. Ранее (¹) наличие двух каналов наблюдалось лишь на диодах из Ga As при азотной температуре.

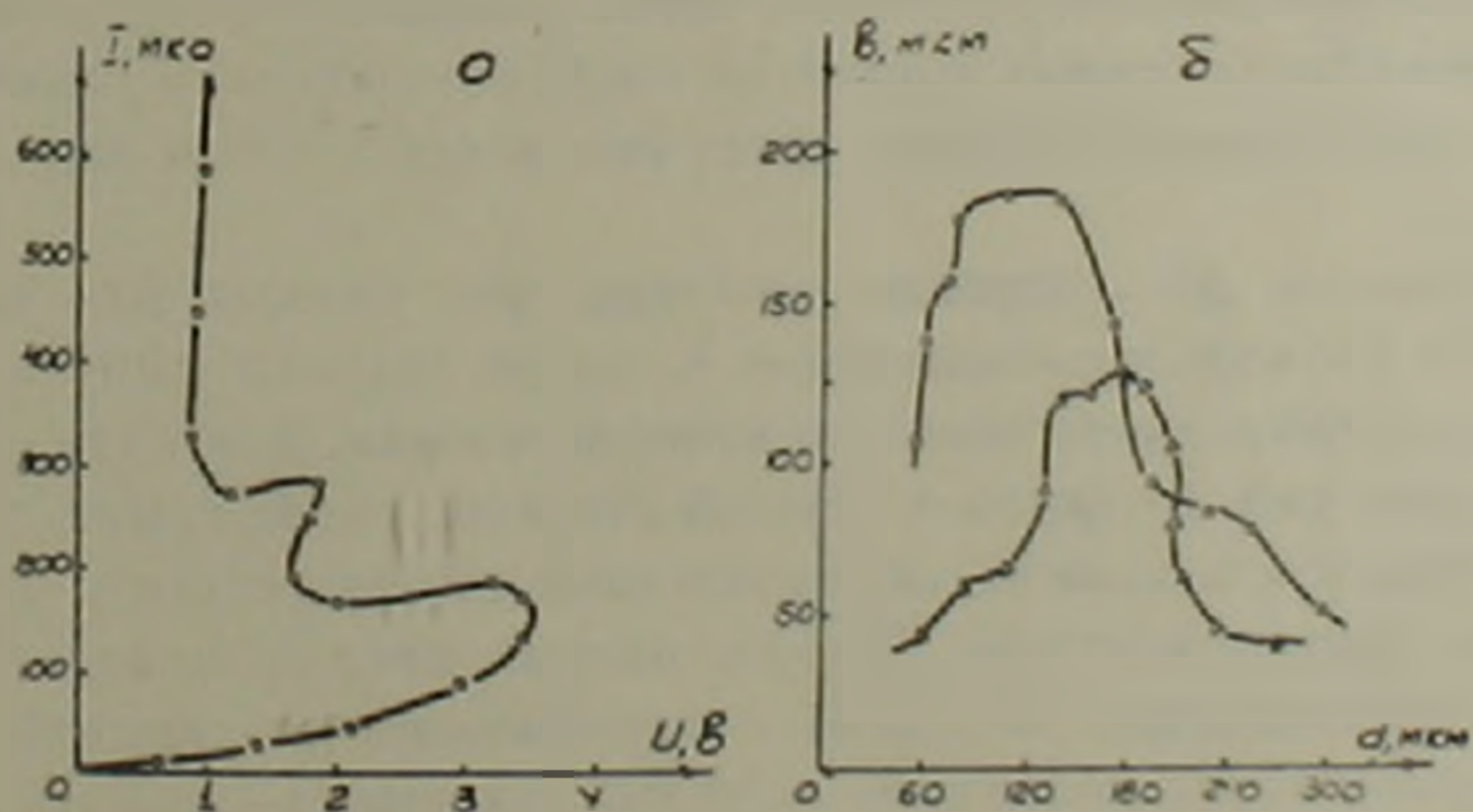


Рис. 4. а—вольт-амперная характеристика диода с двумя срывами; б—зависимость ширины b каждого из каналов от расстояния между контактами d . 1—канал с большой фоточувствительностью; 2—канал с меньшей фоточувствительностью. Ширина базы диода 220 мкм

Поперечное магнитное поле напряженностью до 1 кГс приводит к смещению по базе средней части канала на величину 10—20 мкм, не изменяя его размеров на поверхности шлифа.

2. Все вышесказанное в полной мере относится и к диодам, изготовленным из кремния, компенсированного цинком, которые, кроме того, обладали рядом интересных свойств.

Прежде всего такие диоды были крайне чувствительными к освещению. Это выражалось в том, что для их переключения требовались интенсивности света во много раз меньшие, чем для диодов из кремния с примесью кадмия. (Так, если для диодов с примесью кадмия для переключения была необходима интенсивность $\sim 6,3 \cdot 10^{21}$ квантов/см² сек, то для диодов с примесью цинка — $\sim 1,8 \cdot 10^{20}$ квантов/см² сек). Кроме этого, распределение фотоответа по базе диода на участке положительного сопротивления носило более равномерный характер, чем для диодов с кадмием, что, вероятно, связано с более однородной компенсацией этих диодов.

При локальном освещении излучением лазера базы диода последний переключался из области положительного в область отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике, где образовывался канал, по которому протекал весь ток. В этом случае в отличие от диодов с кадмием, где для переключения необходимо было осветить какую-то определенную область базы, диоды с цинком переключались при локальном освещении нескольких участков базы, расположенных не далее, чем 30—40 мкм от контактов. Уход светового пятна в сторону из области образовавшегося канала на расстояние 10—20 мкм приводит к обратному переключению диода — из области отрицательного в область положительного сопротивления вольт-амперной характеристики. Следует заметить, что при наличии канала тока освещение других участков базы не приводит более к образованию нового канала.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что в случае плоских и достаточно протяженных контактов и при однородной компенсации базы, такой канал тока возможно будет перемещать путем движения луча лазера (³).

Проведенное исследование показало, что каналы для протекания тока имеют двойное происхождение. С одной стороны, они обусловлены неоднородностями, имеющимися в материале базы. Эти каналы широкие и существуют уже до срыва. С другой стороны, после срыва образуются сравнительно узкие каналы, обусловленные возникающим у диода отрицательным сопротивлением. Причем вторые каналы находятся внутри первых. Предложенная методика с использованием светового зонда в виде круглого пятна диаметром ~ 10 мкм позволяет изучать характер протекания тока в двухкоординатном измерении у диодов с небольшой площадью базы.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Армянской ССР

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ Բարակից-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԴՅԱՆՑ, Ա. Ա. ՍՏԵՊԱՆՈՎ,
Բ. Ս. ԲԱՐՍԵՂՅԱՆ, Ս. Պ. ՄՈՎՋԱՆ

Կադմիումով և ցինկով կոմպենսացված սիլիցիումի դիոդներում հոսանքի
անհամասեռ անցումը

Աշխատանքում բերված են վոլտամպերային ընութագծերում բացասա-
կան դիմադրության տիրույթով սիլիցիումի դիոդների բազայի ֆոտոդզայնու-
թյան վերաբերյալ տվյալներ:

Ցույց է տրված, որ բացասական դիմադրության տիրույթում դիոդով անց-
նող հոսանքը ներձգվում է 80—200 միկրոն տրամագծով հոսանքի:

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ A. M. Barnett, A. G. Milnes, J. Appl. Phys., 37, 4215 (1966). ² R. Melngalls, A. G. Milnes, J. Appl. Phys., 33, 995 (1962). ³ A. M. Barnett, H. A. Jensen, Appl. Phys. Lett., 12, 341 (1968). ⁴ М. Е. Алексеев, Н. В. Варламов, В. П. Сондаевский, Электронная техника, сер. 6, № 1, 1968. ⁵ М. Е. Алексеев, Н. В. Варламов, Э. А. Полторацкий, В. П. Сондаевский, ФТП, 3, 1787 (1969). ⁶ В. Н. Дульднер, В. А. Петрусевич, ФТП, 4, 1662 (1970). ⁷ Г. М. Авакьянц, Р. С. Барсегян, А. А. Степанов, ДАН Арм ССР, т. XLIX, № 4 (1969).