

УДК 537.312.5

ФИЗИКА

Член-корреспондент АН Армянской ССР Г. М. Авакьянц,
 С. А. Тарумян

О действии электронов с энергией до 100 кэв на
 полупроводниковые структуры

(Представлено 10/VI 1980)

Как было показано нами ранее ⁽¹⁾, те причины, которые приводят к N-образности ВАХ для коротких диодов, в случае длинных диодов обуславливают сублинейную ВАХ. Одной из особенностей таких ВАХ является то, что формулы для ВАХ явно содержат величину E_d — напряженность электрического поля на тыловом контакте. Это отличает такую зависимость, скажем, от обычных формул для длинных диодов с суперлинейной ВАХ ⁽²⁾. В формулы для ВАХ здесь поле E_d в первом приближении не входит.

Нами были выполнены эксперименты по действию электронов средних энергий (до 20 кэв) на полупроводниковые длинные диоды из кремния, компенсированного цинком. В большинстве случаев у наших диодов (с S—ВАХ) до срыва наблюдалась сублинейная ВАХ. У всех диодов с сублинейной ВАХ было отмечено, что облучение электронами области базы диода у тылового контакта, во-первых, приводит к увеличению тока при прежнем напряжении на диоде до срыва. Во-вторых, ВАХ под действием пучка электронов становится менее сублинейной (кривая выпрямляется) (рис. 1). Нам представляется, что предложенная нами теория сублинейности для длинных диодов ⁽¹⁾ вполне объясняет все эти экспериментальные данные. При действии пучка электронов в базе диода появляются электронно-дырочные пары. Под действием электрического поля в базе эти пары протаскиваются к тыловому контакту (база у диодов была p-типа, а диод был смещен в прямом направлении). Благодаря этому сопротивление диода у тылового контакта снижается, и, следовательно, напряженность электрического поля уменьшается. Приведем в качестве примера из ⁽¹⁾ формулу (16) для диода с сублинейной ВАХ

$$V = \frac{AJ^\nu E_d^{2-\nu}}{(2-\nu)u_n^\nu}, \quad (1)$$

где $1 < \nu < 2$, A — постоянная, u_n — подвижность электронов. Отметим, что сублинейность здесь возникает при любой зависимости E_d от тока,

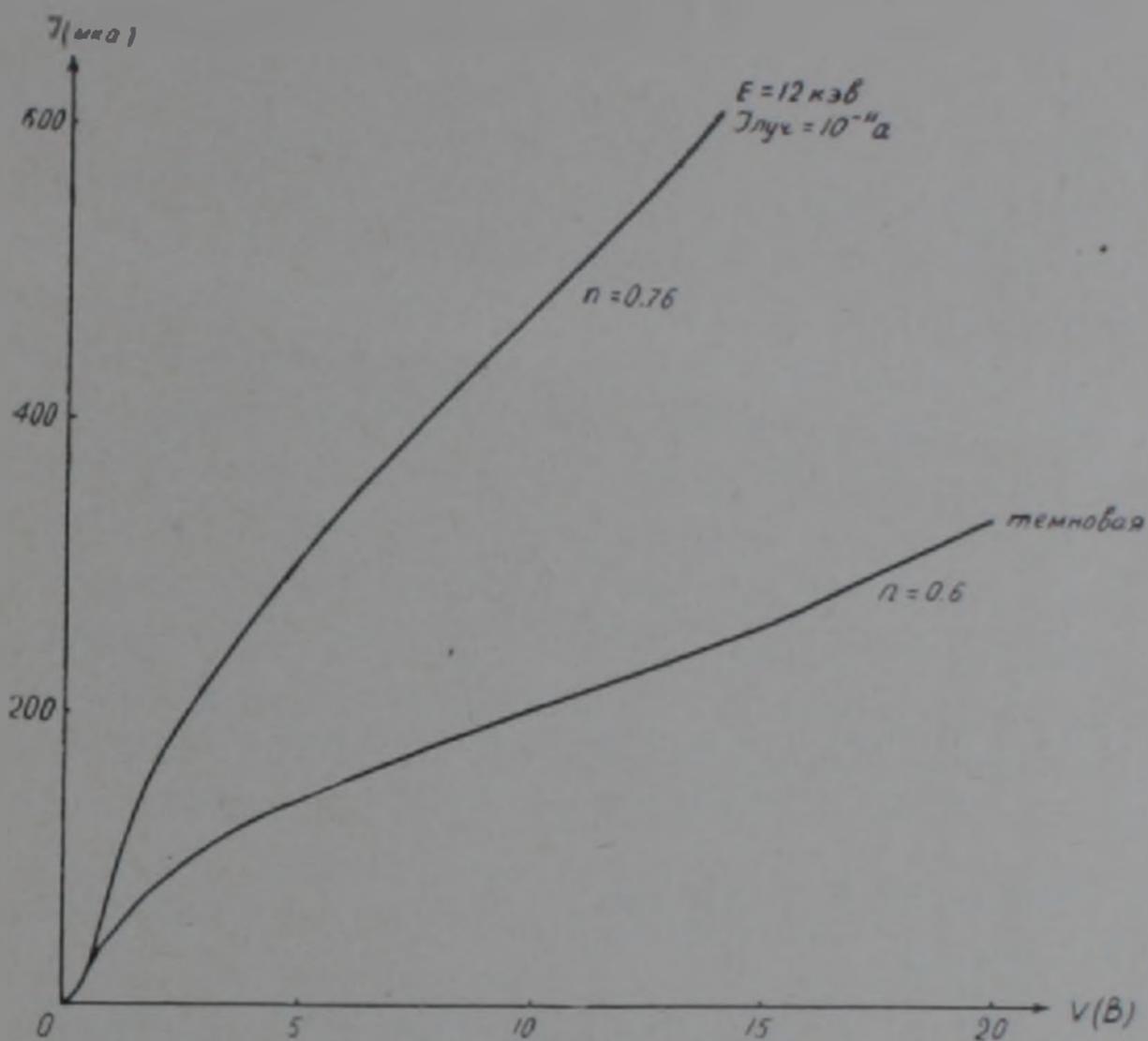


Рис. 1. ВАХ диодов с примесью цинка (темновая и под действием пучка электронов)

если только поле E_d растет с током. Из формулы (1) видно, что при уменьшении E_d уменьшается и V . Это значит, что прежним напряжениям будут теперь соответствовать большие токи. В (1) положение максимума E не вошло. Стало бы, если максимальное поле E_d находится не только на контакте, но и вблизи него и ВАХ практически снова определяется формулой (1), то и в этом случае мы можем сослаться на приведенную теорию при объяснении наблюдаемых свойств длинных диодов. Заметим, что на эксперименте максимальное поле E_d находилось на некотором удалении от тылового контакта (рис. 2). В (2) имеется также следующая формула для ВАХ сублинейного диода:

$$V = \frac{(AJ^\nu)^{\frac{1}{\nu-1}} d^{\frac{\nu-2}{\nu-1}}}{[u_n^\nu(\nu-1)]^{\frac{1}{\nu-1}}}, \quad (2)$$

причем $\nu > 2$. Сюда поле E_d уже не входит, но d есть положение максимума поля. Не трудно видеть, что вследствие протаскивания носителей тока к тыловому контакту максимум поля будет смещать-

ся к инжектирующему контакту, а следовательно, координата максимума поля d при прежнем токе должна уменьшаться. Согласно (2)

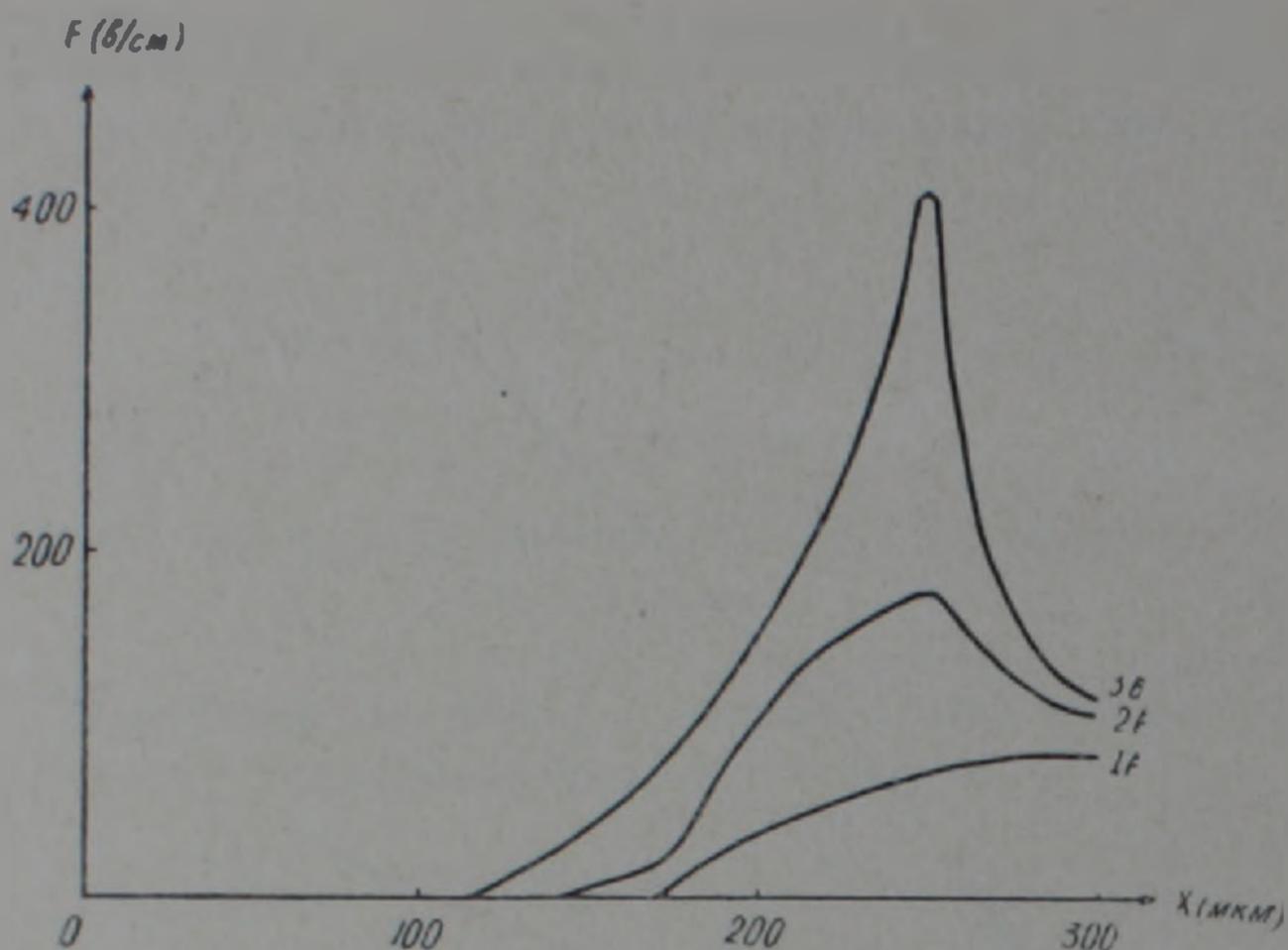


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля от длины базы при разных смещениях на дне

это вновь приведет к снижению V , т. е. к увеличению тока при прежнем напряжении.

Конечно, при облучении может меняться не только E_d или d , но и параметр ν . Но это лишь увеличивает число вариантов теории, которые способны объяснить наблюдаемые нами экспериментальные закономерности. Важно, что это можно сделать уже при самых простых и естественных предположениях.

Что касается того факта, что при облучении электронами ВАХ становится менее сублинейной, то из формулы (14) в (1)

$$V = \frac{E_d(\nu-1)}{a(\nu-2)} \left[(1+ad)^{\frac{\nu-2}{\nu+1}} - 1 \right], \quad (3)$$

где $\nu \geq 1$, $a = E_d^{\nu-1} u_n^{\nu} (\nu-1) / A J$, видно, что при $ad > 1$, скажем, до облучения, имеет место явная сублинейность, тогда как если $ad < 1$, (во время облучения ad уменьшается при том же токе и том же ν), V зависит лишь от E_d и при слабой зависимости E_d и d от тока возникнет „вертикаль“ на ВАХ, т. е. сублинейность полностью исчезнет. Возможны и другие аналогичные объяснения. Таким образом, предложенная в (1) теория способна объяснить как высокую чувствительность исследованных нами длинных диодов к действию пучка электронов в области тылового контакта, так и увеличение во время облучения тока, при прежнем напряжении, а также и исчезновение сублинейности.

Теория в (1) предсказывает концентрацию поля вблизи тылового контакта, т. е. поле распределено резко асимметрично—велико вблизи

тылового контакта и очень мало около инжектирующего контакта. На рис. 2 показана экспериментальная кривая распределения поля E по базе диодов из кремния с примесью цинка. Наличие максимума на кривой есть следствие двойной инжекции. В предложенной нами в (1) теории в первом приближении учет инжекции с тылового контакта не принес бы каких-либо новых качественных результатов, необходимых для объяснения экспериментальных данных, хотя он необходим для конкретного расчета d_{\max} или $E_{d_{\max}}$.

Ранее (3-5) нами было исследовано влияние электронов средних (до 20 кэв) энергий на свойства диодов из кремния, компенсированного цинком. С целью выяснения возможностей применения указанных диодов как датчиков электронного потока в электронных микроскопах и электронографах эти исследования были продолжены вплоть до энергий 100 кэв с достаточно длинным временем облучения. Измерения показали, что наибольшая чувствительная область в базе диодов к воздействию электронного пучка, при прямом направлении протекания тока (см. (4)), с увеличением энергии электронов расширяется в сторону $p-n$ перехода, и при $E=100$ кэв это увеличение составляет порядка 50% от первоначальной величины. С увеличением потока электронов напряжение срыва падает, а ток срыва $I_{\text{ср}}$ увеличивается сублинейно и стремится к насыщению. Как и следовало ожидать, ОС на ВАХ диодов в этом случае исчезает при достаточно низких токах пучка. При энергии электронов 40 кэв сублинейному участку в зависимости $I_{\text{ср}}$ от тока падающих электронов предшествует суперлинейная зависимость. Последнее имело место при ранее проведенных измерениях с энергией электронов до 20 кэв.

В работе (4) предполагалось, что коэффициент усиления K вышеуказанных диодов должен увеличиваться с дальнейшим увеличением энергии падающих электронов. Действительно, измерения показывают,

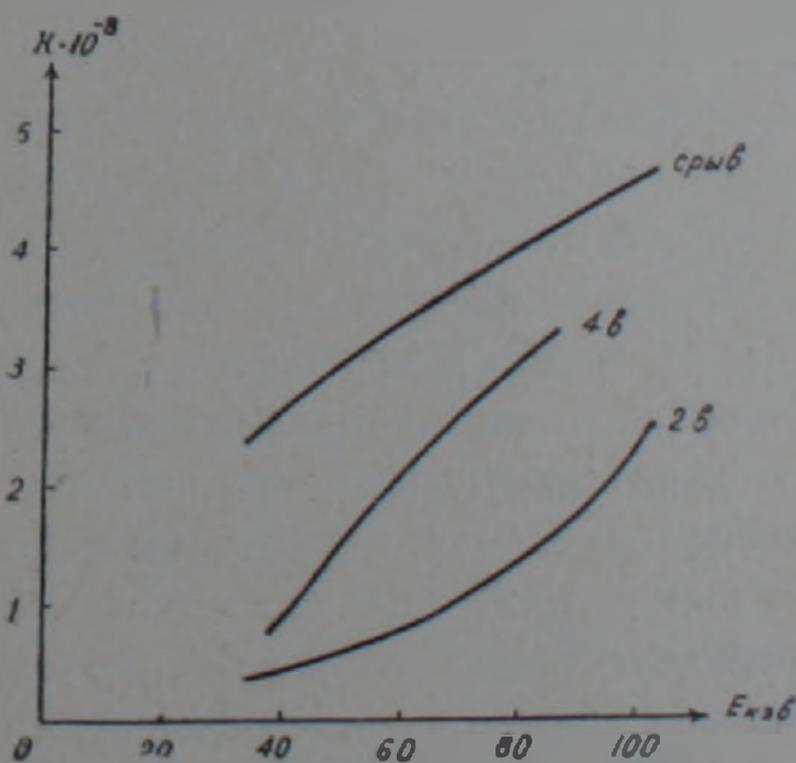


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от энергии падающих электронов при разных постоянных смещениях на диоде

что при энергии 100 кэв максимальная величина K достигает значения $4,5 \cdot 10^8$. Из рис. 3 видно, что с увеличением смещения на диоде суперлинейная зависимость K от E электронов, имеющая место и при энергиях меньше 20 кэв (⁴), сменяется на сублинейную. Вышеуказанные диоды под действием электронов исследовались также при обратном смещении на p - n переходе. Как и следовало ожидать, наиболее чувствительной областью в этом случае в базе диода является окрестность p - n перехода. Суперлинейная темновая ВАХ под действием пучка электронов переходит на сублинейную. Причем чем больше ток или выше энергия электронов, тем сильнее выражается сублинейность. С увеличением энергии или тока пучка при данном постоянном смещении на диоде обратный ток через него стремится к насыщению. Такая же закономерность была выявлена при исследованиях с энергией электронов меньше 20 кэв (⁴). Сублинейный характер зависимости коэффициента усиления от энергии электронов выражен настолько сильно, что кривая практически переходит на насыщение уже при энергиях $60 \div 80$ кэв. Измерения показали, что максимальное значение K при обратном смещении (35 в) на диоде равно $5 \cdot 10^6$. Приведенное в (⁴) объяснение полученных больших значений K при обратном смещении на p - n переходе вполне применимо и к этому случаю. Оно, как известно, основывается на наличии утечки в p - n переходе. Следует указать также, что длительное облучение образцов (несколько часов) электронами с энергией 100 кэв не привело к возникновению необратимых изменений темновой ВАХ.

Были изготовлены и исследованы под действием электронов средних (до 20 кэв) энергий как объемные, так и поверхностные симметричные структуры из кремния, компенсированного цинком с базами n -типа. Параметры материала до и после компенсации приведены в (⁶). p -области диодов изготавливались напылением алюминия с последующим отжигом. Некоторые из полученных образцов имели S-образную ВАХ с $V_{ср} > 150$ в. Большинство же диодов не имели S-характеристики. Во время исследований свойств диодов при действии электронного пучка указанных энергий были выявлены инерционные явления, не имевшие места в $p^+ - n - n^+$ объемных структурах. Измерения показали, что под действием потока электронов постоянной мощности величина изменения тока через некоторые объемно-симметричные структуры сильно зависела от времени облучения (несколько минут). Подобное явление не было обнаружено при нагревании образцов до $60 \div 70^\circ\text{C}$. После отклонения потока электронов ВАХ диодов возвращаются в исходное состояние за $30 \div 60$ мин. Этим свойством обладали все изготовленные поверхностно-симметричные структуры. Поэтому на них и не удалось провести количественных измерений. Как и следовало ожидать, чувствительная область в симметричных структурах находилась в окрестности обратносмещенного p - n перехода. Количественные измерения, проведенные на объемно-симметричных структурах, имевших не зависящие от времени облучения ВАХ, под влиянием электронов с энергией до 20 кэв показали, что максимальное значение коэф-

фициента усиления примерно равно 10^6 для обоих направлений протекания тока.

Исследовалось также влияние электронов с энергией $40 \div 100$ кэВ на свойства диодов из кремния с примесью никеля. При этих измерениях не было получено качественно новых закономерностей, отличных от ранее обнаруженных на диодах из кремния с примесью цинка. Максимальная величина K исследованной партии диодов при 100 кэВ составила 10^7 . Качественные оценки показывают, что приведенное значение K для одной партии образцов не является предельно максимальным для этих диодов вообще. Намечается в ближайшем будущем провести подробные исследования кремниевых диодов с примесью никеля под действием электронов средних энергий.

Авторы выражают благодарность С. В. Минасяну за предоставление диодов с примесью никеля.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Армянской ССР

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ ԲՊՐԱԿԻԳ-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԿՅԱՆՑ, Ս. Ա. ԽԱՌՈՒՄՅԱՆ

Մինչև 100 կէՎ էներգիայով էլեկտրոնների կիսահաղորդիչային սարքերի վրա գործող ազդեցության վերաբերյալ

Աշխատանքում ուսումնասիրված են ցինկով կոմպենսացված սիլիցիումային $p^+ - n - n^+$ ստրուկտուրաների հատկությունները 40—100 կէՎ էներգիայով օժտված էլեկտրոնների ազդեցության տակ: Ցույց է տրված, որ (¹) աշխատանքում առաջարկված տեսությունը բավարար ճշտությամբ բացատրում է վերոհիշյալ ստրուկտուրաների որոշ հատկությունները միջին էներգիաներով էլեկտրոնների ազդեցության դեպքում:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Г. М. Авакьянц, С. А. Тарумян, ДАН АрмССР, т. 69, № 3 (1979). ² М. А. Ламперт, П. Марк, Инжекционные токи в твердых телах, «Мир», М., 1973. ³ Г. М. Авакьянц, З. Н. Адамян, С. А. Тарумян, ДАН АрмССР, т. 59, № 2 (1974). ⁴ Г. М. Авакьянц, С. А. Тарумян, ДАН АрмССР, т. 60, № 5 (1975). ⁵ С. А. Тарумян, ДАН АрмССР, т. 62, № 3 (1976). ⁶ Г. М. Авакьянц, З. Н. Адамян, Р. С. Барсегян и др., ДАН АрмССР, т. 52, № 2 (1971).