

УДК 539.293.537.312.5

ФИЗИКА

Член-корреспондент АН Армянской ССР Г. М. Алакьянц,  
С. А. Тарумян**Действие электронов низких энергий на полупроводниковые  
диоды**

(Представлено 16/1 1975)

За последнее время интерес к созданию и исследованию полупроводниковых приборов, чувствительных к воздействию электронного потока с энергией до 40 кэв, резко возрос в связи с расширением области их применения. В частности, такие приборы используются в виде составной части электроннооптических преобразователей, которые служат автогидами для фиксации положения звезды в фокусной плоскости телескопа (<sup>1</sup>). В работе (<sup>2</sup>) описывается устройство и принцип работы мощного электронного усилителя, который в схемах может заменить двадцать полупроводниковых триодов и выполнен на основе чувствительного к электронному потоку элемента. Таким образом, поиск новых полупроводниковых приборов с большим коэффициентом усиления относительно возбуждающего электронного тока необходим.

Данная работа посвящена дальнейшему изучению воздействия электронного потока с энергией порядка 5 - 20 кэв на характеристики диодов из кремния, компенсированного цинком. Технология изготовления исследованных р<sup>+</sup>-п-п<sup>+</sup> структур и методика эксперимента подробно описаны в работах (<sup>3,4</sup>). Измерения проводились при комнатной температуре.

Известно, что в диодах с двойной инжекцией электрическое поле в базе диода неоднородно и имеет резко выраженный максимум, который в зависимости от структуры и компенсирующей примеси может находиться в разных частях базы (<sup>4,5</sup>). Исходя из этого ожидалось, что чувствительность разных частей базы исследованной структуры к воздействию электронного облучения будет различна. Для доказательства последнего снимались вольтамперные характеристики (ВАХ) диодов при прямом направлении тока под действием луча. При этом часть базы, начиная с одного из контактов постепенно закрывалась металлической фольгой. Измерения показывали, что ВАХ диодов не меняются, когда база покрывается с р-п перехода вплоть до 210 мк при общей ее длине равной 250 мк. С целью установления приблизительных размеров

эффективной площади, покрывалась также и часть базы в поперечном направлении. ВАХ диодов и в этом случае не менялись вплоть до ширины базы, равной размерам токопроводящего канала ( $\approx 250 \text{ мк}$ ). При последующем уменьшении ширины открытой части базы чувствительность диодов к воздействию электронного луча падает. Уменьшение чувствительности в последнем случае вполне понятно, так как число созданных лучом носителей становится меньше, чем при облучении всего токопроводящего канала. При облучении базы вне канала на расстоянии, большем диффузионной длины, образованные пары носителей не попадают в токопроводящий канал, вследствие чего диод не чувствует действия электронного пучка. Таким образом, чувствительность диода не изменится, если вместо облучения всей базы диода облучать электронами узкую площадь, размеры которой во много раз меньше площади всей базы. Этот факт весьма полезен при определении максимального коэффициента усиления диодов. При закрывании половины базы, начиная уже с тылового контакта, диод практически не чувствителен к воздействию электронного луча.

При уменьшении этой закрытой части в сторону тылового контакта чувствительность диодов постепенно возрастает. Это объясняется тем, что число вторичных носителей попадающих в обедненную область базы диода постепенно возрастает.

При практических применениях приборов чувствительных к воздействию электронов низких энергий важным параметром является

коэффициент усиления —  $K = \frac{I - I_0}{I_{\text{луч}}}$ , где  $I_{\text{луч}}$  — ток электронного луча.

$I_0$  — ток через образец без воздействия луча,  $I$  — ток через образец при воздействии луча. На рис. 1 показана зависимость  $K$  от энергии (а) и тока луча (б) для вышеупомянутой р-п-п+ структуры при разных смещениях в прямом направлении. Рост  $K$  с увеличением смещения объясняется суперлинейной зависимостью ВАХ диодов до срывной области. Из рисунка 1 (а) видно, что при энергии падающих частиц 20 кэВ кривые не проявляют тенденции к насыщению. Следовательно,  $k = 10^7$  не является предельно возможным значением коэффициента усиления данных приборов. Столь большие значения  $K$  данных приборов объясняются внутренним усилением, которое осуществляется следующим механизмом. В работе (3) сообщалось, что удельное сопротивление базы диода равно 10 ком и основная часть приложенного внешнего напряжения падает на базу; лишь небольшая часть его приходит на р-п переход. При облучении электронами сопротивление эффективной области базы уменьшается. Это приводит к перераспределению напряжений между базой и р-п переходом, смещение на последней увеличивается, и это, в свою очередь, вызывает дополнительную инжекцию носителей и, следовательно, еще большее возрастание тока через диод. Таким образом, благодаря наличию р-п перехода и высокоомной базы коэффициент усиления получается на несколько порядков больше.

лем должно получаться для кремния по формуле  $K = \frac{E(\text{эВ})}{3,5}$  (°).

Зависимость  $K$  от тока луча имеет иную формулу (рис. 1, б). Так как знаменатель в выражении для  $K$  непрерывно растет, то форма вышеупомянутой зависимости определяется темпом роста разницы токов  $I - I_0$ . В данном случае он оказался более медленным, что и привело к падению  $K$  с ростом  $I_{\text{луч}}$ .

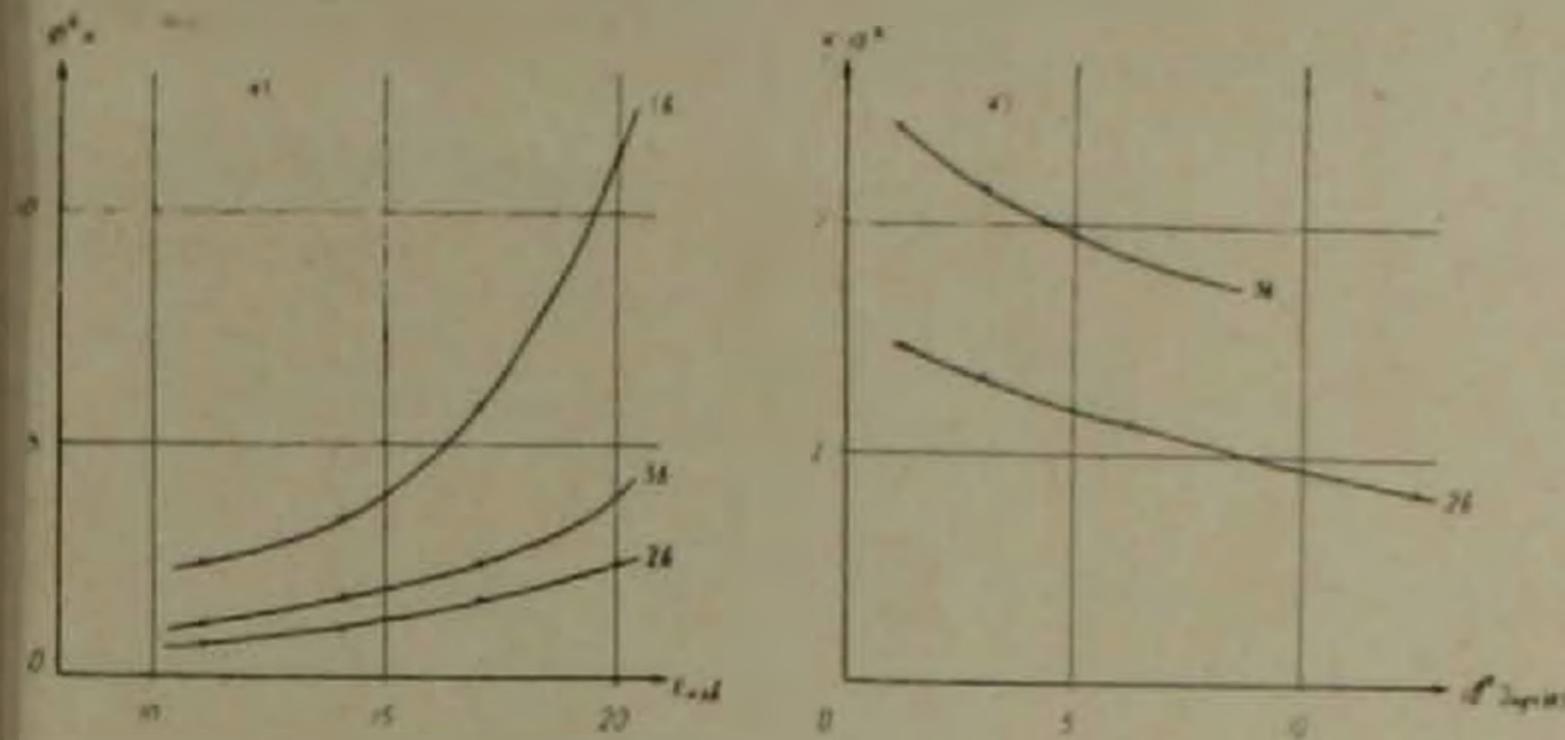


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления от энергии (а) и тока (б) электронного луча при разных приложенных в прямом направлении напряжениях на диоде

При исследовании влияния электронного луча на обратные вольт-амперные характеристики упомянутых диодов, выявлен ряд новых закономерностей. В отличие от случая прямого направления тока, при облучении половины базы, вместе с тыловым контактом, ВАХ диодов изменялись намного слабее, чем при облучении другой половины вместе с р-п переходом.

Величина обратного тока диода с увеличением энергии и тока падающих электронов сначала растет быстро, а затем переходит в насыщение. При облучении базы диода образованные пары носителей диффундируют в направлении р-п перехода, дошедшие разделяются его широким и через переход протекает дополнительный ток. Если носители образовались на большем расстоянии от р-п перехода, чем диффузионная длина, то ясно, что эти носители не дойдут до перехода и не дадут вклада в ток. Следовательно, коэффициент усиления должен определяться

по формуле  $K = \frac{E(\text{эВ})}{3,5}$  (°). Из рис. 2 видно, что  $K$  в данном случае

больше, чем предсказывается этой формулой. Эти явления легко объясняются при предположении наличия некоторой утечки в р-п переходе. Действительно, обратная ВАХ линейна вплоть до напряжений 40 в. С другой стороны, как уже говорилось, облучение области тылового контакта вызывает изменение характеристик диодов, хотя эта область находится на расстоянии нескольких диффузионных длин от р-п перехода. Так как сопротивление базы достаточно большое, то некоторая

часть приложенного внешнего напряжения падает на него. При облучении электронами тыловой области, базы, его сопротивление падает, а падение напряжения на р-п переходе увеличивается. При наличии утечки это приводит к возрастанию тока через диод. Из рис. 2 видно, что в отличие от случая прямого направления протекающего тока, зависимость  $K$  от  $E$  переходит в сублинейную, а с увеличением количества возбуждающих электронов монотонно уменьшается. Увеличение  $K$  с увеличением напряжения на диоде обусловлено возрастанием дрейфовой длины неравновесных носителей, т. е. носители уже с более далеких частей базы доходят до р-п перехода.

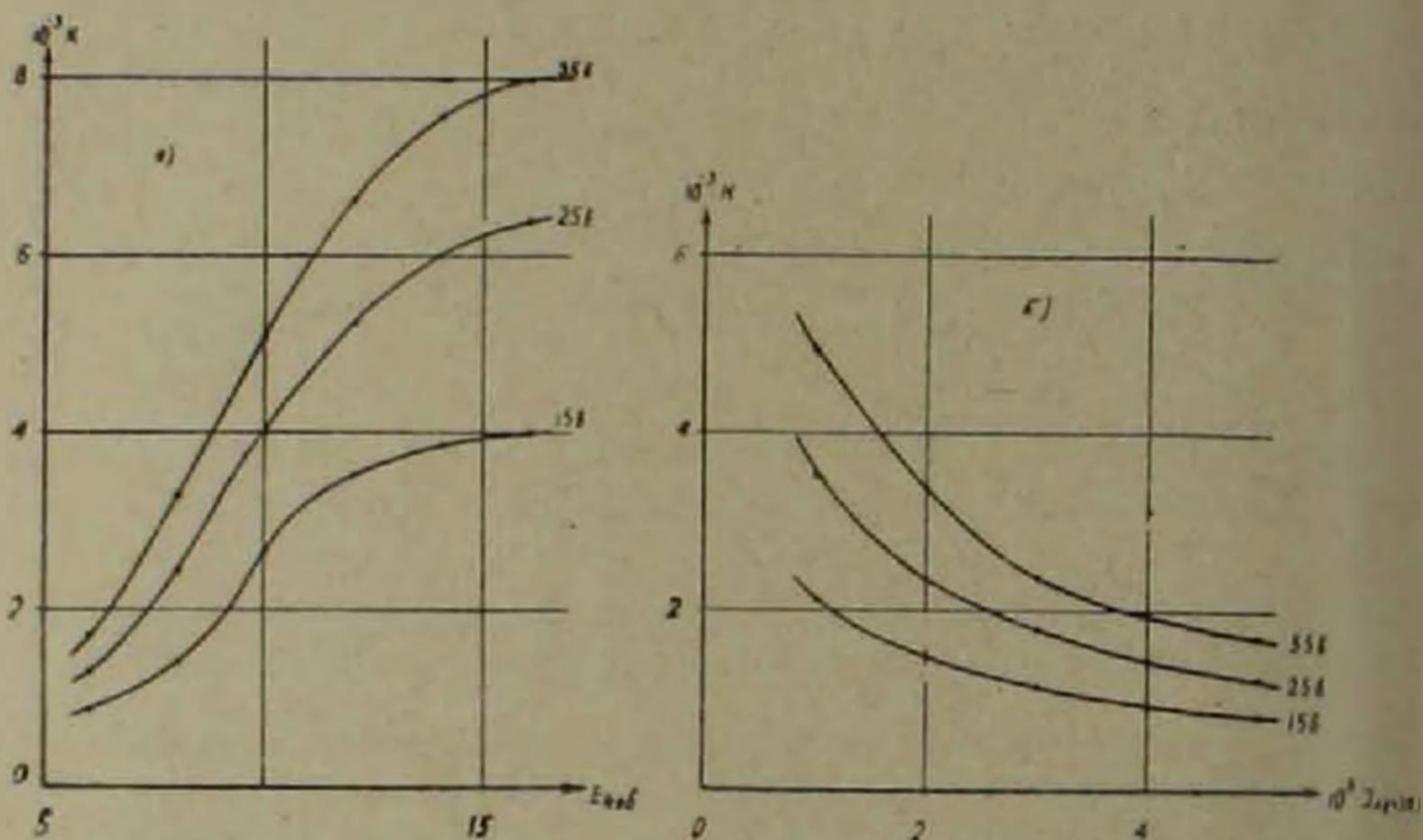


Рис 2 Зависимость коэффициента усиления от энергии (а) и точка (б) электронного луча при разных приложенных в обратном направлении напряжения на диоде

Большой интерес представляет также исследование диодов из кремния с некомпенсированной базой. В отличие от компенсированных они оказались практически нечувствительными к воздействию электронного пучка при облучении базы с покрытыми р-п переходами. При облучении перехода и части базы, примыкающей к нему, чувствительность оказалась примерно порядка чувствительности компенсированных диодов.

На прямую ветвь ВАХ этих диодов облучение не оказывало заметного влияния. Это вполне естественно, так как база низкоомная и ее модуляция под действием луча не приводит к заметному перераспределению напряжения между базой и р-п переходом. Отметим также, что насыщение обратного тока с увеличением энергии и тока падающих электронов наблюдается и в этом случае. Форма кривых зависимости  $K$  от  $E$  и  $I_{\text{обр}}$  примерно подобна изображенным на рис. 2. Большие значения  $K$  также можно объяснить предположением наличия некоторой утечки в р-п переходе, так как у всех образцов зависимость обратного тока от напряжения линейна вплоть до пробойных напряжений. Ясно, что из-за ничтожного сопротивления р-п перехода в прямом направлении

нии эти утечки заметной роли в этом случае играть не могут.

При отсутствии внешнего смещения на диоде утечки в р-п переходе не могут дать вклада в ток при облучении диода в режиме короткого замыкания. Если коэффициент усиления вычислить для этого режима (рис. 3), то он получается намного меньше чем следовало бы ожидать по (6). Для объяснения этого факта достаточно вспомнить, что диффузионная длина носителей в компенсированном кремнии намного меньше, чем в некомпенсированном материале. Следовательно в первом случае число пар дошедших до перехода и разделившихся будет много меньше, чем во втором случае. Ток в режиме короткого замыкания, как известно, как раз обусловлен числом этих разделившихся пар и, следовательно,  $K$  для компенсированного диода в этом режиме должен быть малым.

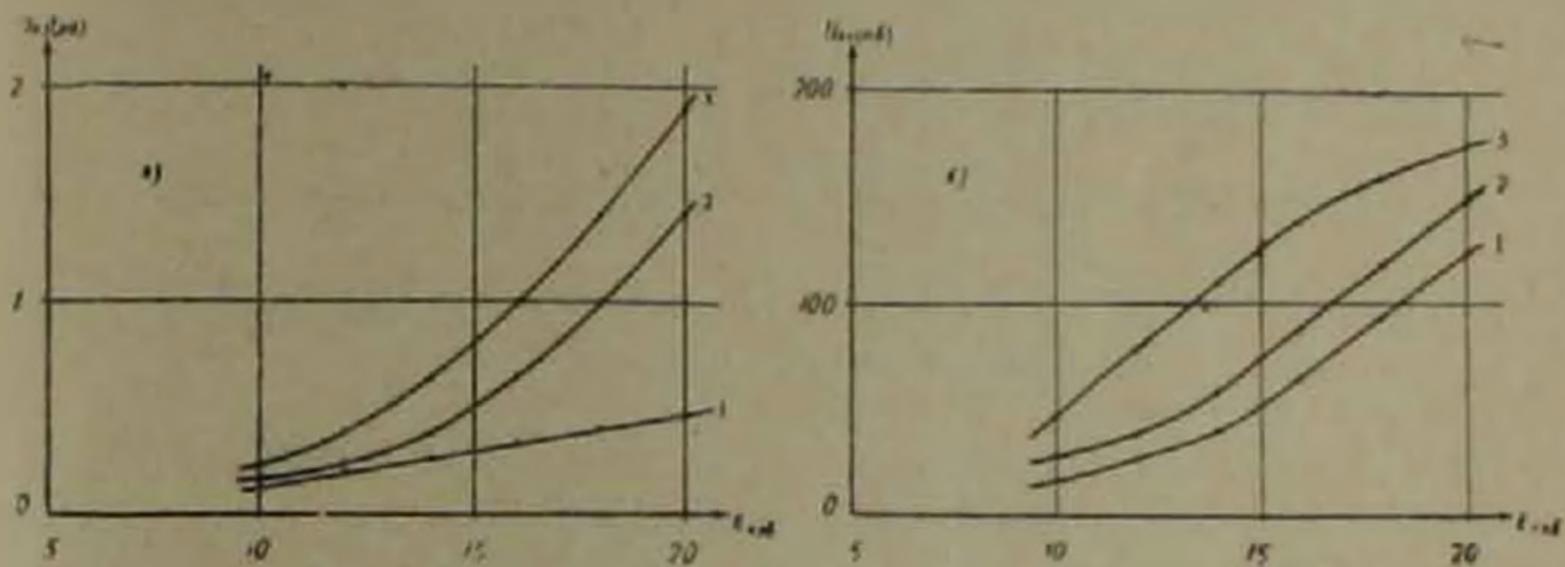


Рис. 3. Зависимость тока короткого замыкания (а) и напряжения холостого хода (б) от энергии электронного луча при разных значениях тока пучка: а) 1—0,005  $\mu$ а, 2—0,01  $\mu$ а, 3—0,015  $\mu$ а; б) 1—0,01  $\mu$ а, 2—0,015  $\mu$ а, 3—0,025  $\mu$ а

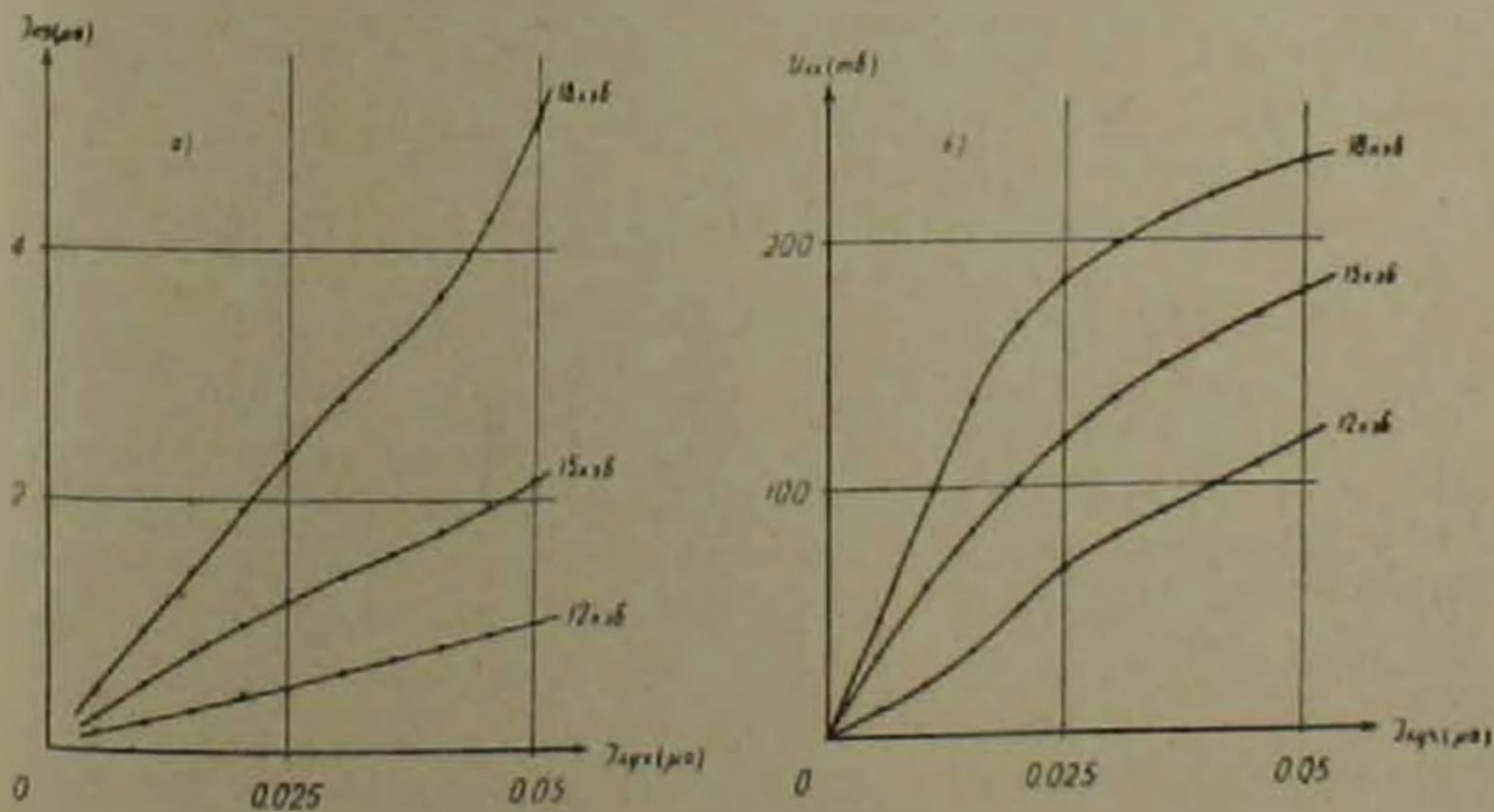
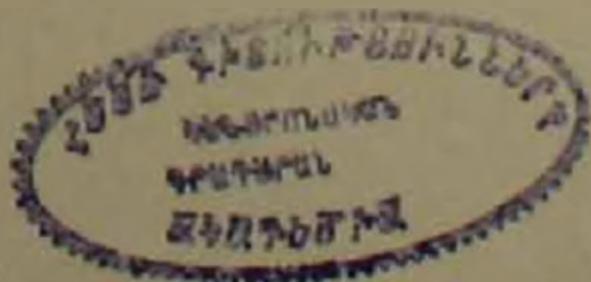


Рис. 4. Зависимость тока короткого замыкания (а) и напряжения холостого хода (б) от тока электронного луча при разных значениях энергии пучка



Заметим, что токи короткого замыкания, с увеличением энергии первичных электронов при фиксированных малых значениях тока последнего сначала меняются линейно с изменением энергии, а затем с увеличением  $I_{\text{луч}}$ , эта зависимость переходит в сублинейную. Примерно такая же картина наблюдается и для  $I_{\text{кз}}$  от  $I_{\text{луч}}$  (рис. 3, б). Поведение напряжения холостого хода в зависимости от энергии и тока луча резко отличается от хода  $I_{\text{кз}}$  (рис. 4). Из рисунка видно, что в обоих случаях функции  $U_{\text{кз}} = U(E)$  и  $U_{\text{кз}} = U(I_{\text{луч}})$  с увеличением тока и энергии луча от суперлинейных переходят в сублинейные.

В конце отметим, что высокий коэффициент усиления электронного тока диодов из кремния, компенсированного цинком, дает основание надеяться, что в дальнейшем откроется перспектива к созданию электронных умножителей на твердом теле.

Институт радиофизики и электроники  
Академии наук Армянской ССР

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ րդրակից-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ, Ս. Ա. ԹԱՌՈՒՄՅԱՆ

Ցածր էներգիաներով օժտված էլեկտրոնների ազդեցությունը  
կիսահաղորդչային դիոդների վրա

Հետազոտված են ցածր էներգիաներով օժտված (մինչև 20 կէվ) էլեկտրոնային փնջի ազդեցությունը կիսահաղորդչային դիոդների վրա: Ցույց է տրված, որ ցիկլով կոմպենսացված սիլիցիումային S-տիպի դիոդներում թիկունքային կոնտակտի մոտ ընկած մի փոքր տիրույթ է հիմնականում զգայուն էլեկտրոնային փնջի նկատմամբ: Նշված տիպի դիոդներում հոսանքի ուժեղացման գործակիցը  $10^7$  կարգի է: Բնութագրի հակառակ ճյուղում ուժեղացման գործակիցները թե կոմպենսացված և թե ոչ կոմպենսացված դիոդներում մոտավորապես հավասար են և չեն անցնում  $10^7$  արժեքից: Չափված են նաև կարճ միացման հոսանքի և սլարապ ընթացքի լարման կախվածություններն էլեկտրոնային փնջի էներգիայից և հասանքից:

#### ЛИТЕРАТУРА — ԿՐԱՆԻՆԻՐՅՈՒՆ

- <sup>1</sup> F. V. Felley, The observatory, Vol. 93, 992, pp. 9-13, (1973). <sup>2</sup> «Электроника» т. 46, № 25, стр. 17, 1973. <sup>3</sup> Г. М. Авакьянц, З. Н. Адамян, С. А. Тарумян, ДАН Арм. ССР, т. LIX, № 2 (1974). <sup>4</sup> Г. М. Авакьянц, З. Н. Адамян, Р. С. Барсегян, С. В. Оганесян, С. А. Тарумян, ДАН Арм. ССР, т. LII, № 2 (1971). <sup>5</sup> Г. М. Авакьянц, Ю. Б. Абрамян, В. И. Сераго, ДАН Арм. ССР, XLVII, № 3 (1968). <sup>6</sup> В. А. Колясников, А. А. Лавренко, Г. Т. Сбежнев, Тезисы докладов первой всесоюзной научно-технической конференции «Фотометрическое измерение и их метрологическое обеспечение», М., стр. 22, 1974.