

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ S-ДИОДОВ ИЗ КРЕМНИЯ, КОМПЕНСИРОВАННОГО ЦИНКОМ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАЛОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Г. М. АВАКЬЯНЦ, С. А. ТАРУМЯН

Проведены исследования переключающих свойств кремниевых диодов с примесью цинка под действием малого гармонического сигнала, наложенного на постоянное смещение, при разных температурах и при постоянном электронном облучении. Экспериментально выявлен механизм такого переключения и определены закономерности изменения числа периодов колебаний, необходимых для срыва, в зависимости от различных параметров.

В работе [1] нами было показано, что диоды из кремния, компенсированного цинком, под действием малого гармонического сигнала, наложенного на постоянное смещение, переходят из закрытого состояния в открытое. Там же было приведено качественное объяснение описанного явления и некоторых наблюдаемых закономерностей. Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению этого эффекта на тех же диодах. Технология изготовления диодов и методика эксперимента описаны в работах [2, 3].

Исследования, проведенные в [1], были выполнены при комнатной температуре. Учитывая, что свойства диодов довольно чувствительны к температуре, мы выполнили измерения, аналогичные [1], и при других температурах. При уменьшении температуры амплитуда синусоидального напряжения, при котором возможно переключение диода в низкоомное состояние, заметно растет. Довольно сильно увеличивается и наименьшее постоянное смещение на диоде, при котором еще имеет место эффект переключения. А при температуре порядка $0 \div 5^\circ\text{C}$ эффект переключения вообще исчезает. Минимум в зависимости нижней граничной частоты от амплитуды переменного сигнала сохраняется (см. [1]), но в этом случае вслед за ростом при увеличении амплитуды следует падающий участок. Такой участок возникает и в случае верхней граничной частоты. Заметим также, что с понижением температуры полосы частот, при которых происходит переключение, сильно сужаются, хотя напряжение срыва увеличивается всего на несколько вольт. При $+70^\circ\text{C}$ наибольшая ширина полосы составляет около 13 кГц. Следует отметить, что с увеличением температуры полоса чувствительности заметно смещается в сторону больших частот. Так, при указанной температуре наибольшая нижняя граничная частота равна примерно 2 кГц, в то время как при 30°C она составляет около 200 Гц. При высоких температурах сохраняется ход зависимости граничных частот от амплитуды переменного сигнала, но эффект проявляется при относительно малых постоянных смещениях.

Предыдущими исследованиями было показано, что диоды из кремния, компенсированного цинком, очень чувствительны к воздействию электронного пучка [2, 4]. Известно также, что электроны с энергией порядка

10 кэВ проникают в кремний всего на один микрон и, следовательно, не могут непосредственно влиять на заселенность примесных центров в базе диодов, как это имеет место в случае изменения температуры. С этой точки зрения представляет интерес исследование явления переключения переменным сигналом при непрерывном облучении электронами. Действительно, во время исследований были установлены существенные отличия в закономерностях переключений, обусловленных температурой и пучком электронов. Оказалось, что изменение напряжения срыва на некоторую величину под действием пучка мало расширяет полосу частот, в то время как такому же изменению $V_{ср}$ при увеличении температуры соответствует гораздо большее изменение полосы. Измерения показывают, что зависимость граничных частот от амплитуды синусоидального сигнала при возбуждении электронами имеет более простой вид. В широком интервале изменения интенсивности пучка вплоть до значений, при которых напряжение срыва мало отличается от остаточного, эти зависимости имеют форму монотонно возрастающей и убывающей функций соответственно для верхних и нижних граничных частот. Смещение полосы в сторону верхних частот имеет место и при увеличении тока пучка, хотя оно заметно слабее, чем при изменении температуры. Следует отметить, что на некоторых образцах при комнатной температуре наблюдались две полосы частот, которые с увеличением амплитуды переменного сигнала сливались в одну. Вторая полоса более низкочастотная и появляется при увеличении постоянного смещения.

Заметим, что во время измерений в некоторых случаях наблюдались нерегулярные низкочастотные колебания (от одного до сотни герц с амплитудой до десятков вольт) между включенными и выключенными состояниями. Подробные исследования показали, что эти колебания, как правило, возникают только на участке роста нижних граничных частот (см. рис. 1 в [1]). Время перехода из низкоомного состояния в высокоомное порядка

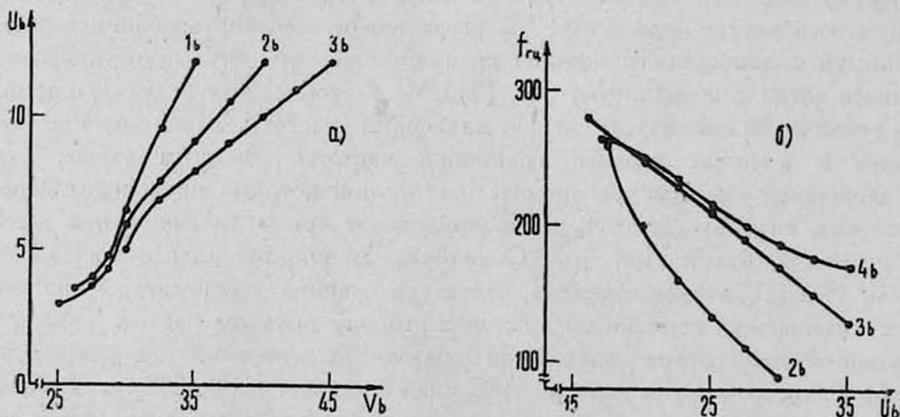


Рис. 1. а) Зависимость амплитуды синусоидального сигнала, приводящего к переходу в высокоомное состояние, от постоянного смещения на диоде при разных первичных амплитудах, с помощью которых был произведен срыв. б) Зависимость частоты синусоидального сигнала, при котором имеет место переход в высокоомное состояние, от постоянного смещения на диоде при разных амплитудах синусоидального сигнала.

сотен миллисекунд, в то время как обратный перескок происходит всего за несколько микросекунд. Нерегулярность этих колебаний, в основном, вызвана тем, что время задержки диода в открытом состоянии со временем меняется хаотически. С увеличением амплитуды переменного сигнала частота, при которой возникают эти нерегулярные колебания, резко понижается. Следует заметить, что эти колебания возникают и тогда, когда переменный сигнал подается после срыва диода постоянным смещением, но в этом случае они происходят между точками минимума и срыва. Время включения и выключения того же порядка, что и при срыве переменным сигналом. С увеличением амплитуды синусоидального сигнала частота нерегулярных колебаний увеличивается, оставаясь примерно на один порядок меньше подаваемой. Одновременно понижается хаотичность и колебания принимают строго релаксационную форму.

Наряду с явлением переключения в низкоомное состояние малым переменным сигналом некоторый интерес представляет также изучение условий возвращения в исходную точку на статической ВАХ. Исследования показали, что оно может произойти либо при увеличении амплитуды синусоидального сигнала, либо при уменьшении его частоты. На рис. 1а приведена зависимость амплитуды переменного сигнала, при котором имеет место переход в высокоомное состояние, от постоянного смещения на диоде для разных первоначальных значений амплитуды, под действием которых был произведен срыв. На рис. 1б представлена частота, при которой диод возвращается в высокоомное состояние, в зависимости от напряжения постоянного смещения при разных амплитудах переменного сигнала, вызвавшего переключение в низкоомное состояние. Таким образом изменением лишь одной амплитуды или частоты синусоидального сигнала можно произвести срыв или восстановление первоначального состояния диода. Если срыв произведен малой амплитудой, то никак нельзя добиться эффекта восстановления. Восстановление не имеет места и тогда, когда срыв производится высокими частотами. Но в этом случае при понижении частоты восстановление происходит начиная со значения нижней граничной частоты.

Следует заметить, что влияние малого переменного сигнала на возврат диода из включенного состояния в запертое можно понять, если допустить, что накопленные за счет переменного сигнала носители образуют утечку (или дополнительный проводящий канал) в базе, что приводит к разрушению основного шнура и переходу диода в закрытое состояние. Отметим также, что величина накопленного в базе заряда определяется не только частотой переменного сигнала, но, несомненно, и временем жизни неосновных носителей. Если под влиянием внешних факторов время жизни уменьшается, то это приводит к увеличению граничных частот. По всей вероятности, в конкретном рассмотренном случае увеличение температуры и интенсивности электронного пучка приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей и, следовательно, смещению полосы в сторону больших частот.

Как было предположено ранее [1], переключение диода из высокоомного состояния в низкоомное под действием малого гармонического сигнала

ла обусловлено накоплением носителей в базе. Прохождение через диод некоторого числа периодов гармонического сигнала вызывает такую модуляцию базы, что данное постоянное смещение оказывается достаточным для его перевода в низкоомное состояние. Определение этого числа периодов при данных значениях постоянного смещения и амплитуды гармонического сигнала было бы экспериментальным доказательством качественных объяснений, содержащихся в [1].

Ниже приводится простой метод определения числа периодов, основанный на следующих соображениях. Если падение напряжения на диоде измеряется с помощью осциллографа с непрерывной разверткой, то повышение смещения фиксируется на экране в виде увеличения отклонения луча от первоначального положения. При наступлении срыва луч опускается в положение, соответствующее минимальному напряжению на диоде (V_{\min}). Следует заметить, что при медленной развертке мы можем наблюдать также и переходные процессы, в частности, можем оценить времена восстановления и перехода диода в низкоомное состояние. Так как последовательно с диодом включено нагрузочное сопротивление, то напряжение на диоде всегда меньше, чем подавалось с источника. Поэтому на осциллографе отклонение луча в момент включения диода будет несколько ниже своего первоначального (в отсутствие включенного диода) положения. Таким образом, при включении в цепь диода луч опускается вниз и занимает положение, соответствующее данному падению напряжения на диоде. Описанная картина имеет место и в том случае, когда на постоянное смещение наложен переменный сигнал. Если напряжение на источнике достаточно большое, то произойдет переход диода во включенное состояние и луч займет положение, соответствующее V_{\min} . В наших измерениях после включения диода в цепь равновесное состояние наступало достаточно быстро. Фронт скачка луча (переходной участок) составлял доли микросекунды.

Теперь рассмотрим случай, когда на постоянное смещение наложен малый переменный сигнал. Разумеется, в этом случае постоянная составляющая падения напряжения меньше напряжения срыва. После установления соответствующих напряжений на источниках диод подключается в цепь. Если срыв, действительно, происходит после прохождения через него n -го количества периодов, то луч сначала должен опуститься на уровень, соответствующий высокоомному состоянию диода, а через некоторое время опуститься еще ниже, но на этот раз уже в основное минимальное положение.

На рис. 2 приведена типичная осциллограмма вышесказанных явлений, снятая при разовой развертке луча. Число колебаний между двумя скачками как раз есть то число периодов, которое необходимо для перевода диода в низкоомное состояние. Верхняя кривая на осциллограмме соответствует ходу кривой тока через диод. Из рисунка видно, что после скачков равновесное состояние тока наступает сравнительно медленно, в то время как напряжение устанавливается довольно быстро. Следует заметить, что данная осциллограмма получена при низких частотах переменного сигнала и при оптимальной развертке луча. С увеличением частоты колебания становятся неразличимыми, и их число нужно определять по протяженности

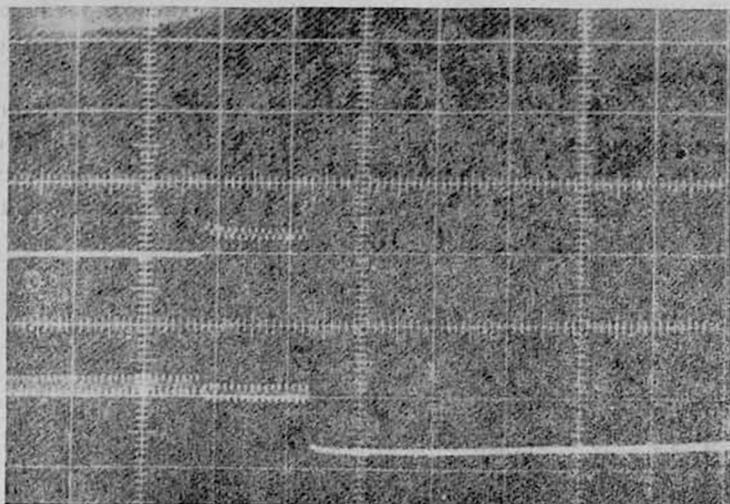


Рис. 2. Осциллограмма, подтверждающая необходимость наличия некоторого количества периодов (участок между двумя скачками), необходимого для перевода диода в низкоомное состояние; нижняя кривая — осциллограмма напряжения, верхняя — осциллограмма тока.

участка между двумя скачками и по величине развертки (заранее зная частоту колебаний) луча. Исследования при разных режимах и на разных образцах показали, что минимальное число периодов, переводящих диод в низкоомное состояние, равно трем (максимальное среднее количество периодов — порядка 170). Отметим также, что при неизменных параметрах каждое новое измерение дает разное значение числа периодов. Это связано с шумовыми и релаксационными колебаниями, имеющими место на положительном участке ВАХ указанных диодов [5]. Действительно, величина накопленного заряда при прохождении переменного сигнала зависит от сопротивления базы диода, которое из-за наличия колебаний постоянно меняется.

Хотя число периодов при каждом новом измерении было различным, нам все же удалось экспериментально проверить некоторые предположения, сделанные в работе [1]. Например, из качественных объяснений следует, что по мере увеличения постоянного смещения на диоде из-за уменьшения его сопротивления количество периодов должно уменьшаться. Измерения показали, что, действительно, с увеличением постоянного смещения число периодов экспоненциально уменьшается. Оно уменьшается также и при увеличении амплитуды синусоидального сигнала. Следует заметить, что за количество периодов принималось среднее значение ($n_{\text{сред}}$) десяти измерений, выполненных при одних и тех же параметрах. Наибольшее среднеквадратичное отклонение составило примерно 25% при $n_{\text{сред}} = 140 \div 170$ периодов. С увеличением амплитуды переменного сигнала и величины постоянного смещения на диоде среднеквадратичное отклонение уменьшает-

ся, а при некоторых значениях этих величин становится равным нулю. Измерения показывают, что с уменьшением $n_{\text{сред}}$ среднеквадратичное отклонение уменьшается, независимо от того, изменением какого параметра было вызвано это уменьшение.

Иной ход имеет зависимость среднего значения количества периодов от частоты переменного сигнала при данной его амплитуде и величине постоянного смещения (рис. 3). Уменьшение $n_{\text{сред}}$ с увеличением частоты, на наш взгляд, объясняется тем, что обычно экстракция носителей идет мед-

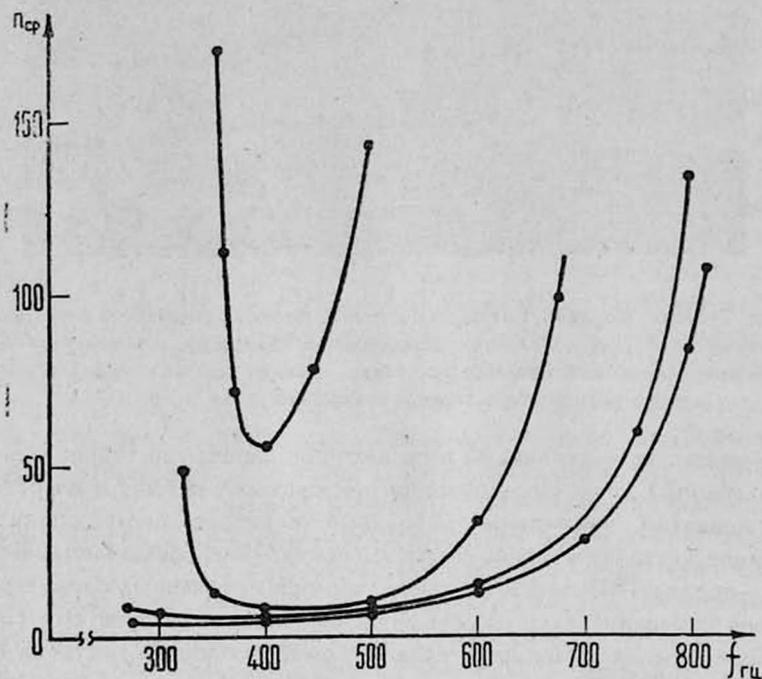


Рис. 3. Зависимость среднего количества периодов, необходимого для перевода диода в низкоомное состояние, от частоты синусоидального сигнала при разных его амплитудах; постоянное смещение на диоде — 25 В.

леннее, чем инжекция и, следовательно, при увеличении частоты практически имеет место только инжекция, вследствие чего накопление необходимой концентрации носителей для срыва происходит быстрее. Но в то же время при большей частоте все меньше носителей успевает продиффундировать в глубь базы. Это приводит к тому, что с дальнейшим увеличением частоты $n_{\text{сред}}$ снова возрастает.

Институт радиофизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 26.V.1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Авакьянц, С. А. Тарумян. Изв. АН АрмССР, Физика, 12, 456 (1977).
2. Г. М. Авакьянц, Э. Н. Адамян, С. А. Тарумян. ДАН АрмССР, 59, 78 (1974).
3. Г. М. Авакьянц и др. ДАН АрмССР, 52, 76 (1971).

4. Г. М. Авакьянц, С. А. Тарумян. ДАН АрмССР, 60, 269 (1975).

5. Յ. Ն. Адамян. Автореферат кандидатской диссертации, Ереван, ЕГУ, 1975.

ՑԻՆԿՈՎ ԿՈՄՊԼԵՍՍԱՑՎԱԾ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ S-ԴԻՈԴՆԵՐԷ
ՓՈՒՍԱՆՋԱՏՈՒՄԸ ՓՈՔՐ ՀԱՐՄՈՆԻԿ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՏԱԿ ԿԱՆՎԱԾ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻՑ
ԵՎ ԱՐԱԳ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐՈՎ ՌՄՐԱՐԿՈՒՄԻՑ

Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ, Ս. Ա. ԹԱՌՈՒՄՅԱՆ

Կատարված են ցինկով կոմպենսացված սիլիցիումային դիոդների փոխանշատիչ հատկությունների ուսումնասիրություններ փոքր հարմոնիկ ազդանշանի ազդեցության տակ տարբեր ջերմաստիճանների և հաստատուն էլեկտրոնային ուժարկման պայմաններում: Փորձնականորեն ուսումնասիրված է այդ փոխանշատման մեխանիզմը և որոշված են խզման ապահովման համար անհրաժեշտ պարբերությունների քանակի փոփոխման օրինաչափությունները կախված տարբեր պարամետրերից:

THE SWITCHING OF ZINC DOPED SILICON S DIODES UNDER
THE EFFECT OF SMALL HARMONIC SIGNAL AS A FUNCTION
OF TEMPERATURE AND FAST ELECTRON IRRADIATION

G. M. AVAKYANZ, S. A. TARUMYAN

The switching properties of zinc doped silicon S diodes under the effect of a small harmonic signal, superimposed on the constant bias are investigated at different temperatures and constant electron irradiation. The mechanism of such a switching is experimentally studied and the dependence of the number of oscillation periods, necessary for a breakdown, on different parameters is determined.