

Г. М. Авакьянц, чл.-корр. АН Армянской ССР, И. Р. Альтман и А. В. Юровский

Измерение наносекундных времен жизни
 в «длинных» диодах

(Представлено 20/IV 1966)

Появление быстродействующих диодов требует соответствующей методики для определения их свойств. Конструирование таких приборов идет либо по пути создания эпитакс. структур, либо за счет использования материалов с малыми временами жизни носителей. Обычно диоды последнего типа относятся к числу так называемых «длинных» диодов, т. е. $L_p \ll d$ (L_p — диффузионная длина дырок, d — ширина базы).

В основном механизм перемещения заряда в большей части баз этих диодов дрейфовый. На основе рассмотрения токовых уравнений можно предложить две методики определения времен жизни неосновных носителей в последнего типа приборах:

$$J_p = e\mu_p p E, \tag{1}$$

$$\frac{i}{l} \frac{dJ_p}{dx} = -\frac{p}{\tau_p}. \tag{2}$$

Из (1) и (2) можно получить:

$$J_p(x) = J_p(0) \exp\left(-\frac{\tau_{\text{пролета}}}{\tau_p}\right), \tag{3}$$

где

$$\tau_{\text{пролета}} = \int_0^x \frac{dx}{\mu_p E(x)}.$$

В случае

$$\tau_{\text{пролета}}(d) > \tau_p \tag{3'}$$

получим, что

$$J_p(d) < J_p(0).$$

Наши эксперименты показали, что (3') в исследуемых нами диодах выполнено.

Интегрирование уравнения непрерывности (2) в пределах от 0 до d с учетом (3') позволяет выразить τ_p через накопленный заряд дырок Q_p и ток дырок через p - n переход:

$$\tau_p = \frac{Q_p}{J_p(0)}. \quad (4)$$

При уровнях инжекции таких, что $\gamma_{p-n} = 1$, где γ_{p-n} - коэффициент инжекции, найдем:

$$\tau_p = \frac{Q_p}{J}. \quad (5)$$

Значит, методика должна основываться на определении полного дырочного заряда Q_p , накопленного в базе диода при протекании тока J . Конечно, в величину Q_p основной вклад дает область, примыкающая непосредственно к p - n переходу, в случае „длинного“ диода, где максимальное скопление заряда дырок, так что тут можно измерить τ_p как функцию прямого тока.

Другой метод основан на следующем очевидном факте. Если мы имеем систему, в которой осуществляется рекомбинация дырок с постоянной времени τ_p , и в нее инжектируется некоторый заряд дырок Q_p , то при условии, что во всем объеме τ_p постоянно, можно выразить зависимость заряда Q_p от времени в виде:

$$Q_p(t) = Q_p(0) e^{-t/\tau_p}. \quad (6)$$

Эта методика должна позволять измерять заряд Q_p в любой момент времени, следующий за концом импульса прямой инжекции. Метод аналогичен измерению времен жизни по спаду инфракрасной фотопроводимости, но измерение проводимости заменяется здесь измерением интегрального заряда Q_p как функции времени.

Время рекомбинации будет складываться здесь из поверхностного и объемного, но в случае наносекундных времен, как показывают наши измерения при разной обработке поверхности диодов, измеренное τ не менялось, определяясь только объемными свойствами материала.

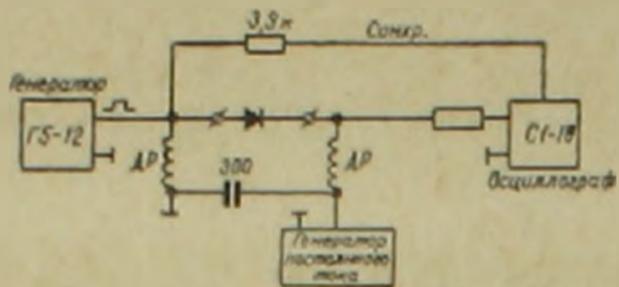
При измерениях величины Q путем экстракции накопленного заряда всегда определенный вклад дает емкостная составляющая разрядного тока, которую при измерениях на малых токах необходимо принимать во внимание (речь идет о емкости системы, запаасающей определенный заряд при смещении диода в прямом направлении).

Измерительная установка для определения величины накопленного в диоде заряда непосредственно в момент выключения прямого тока состояла из генератора тока, собранного на триодах П-201, генератора обратного напряжения Г5-12 и осциллографа С1-10—схема I (фиг. 1).

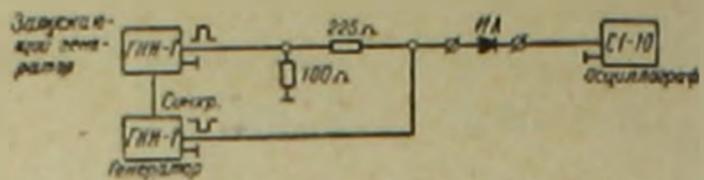
Схема 2 (фиг. 2) для снятия времени релаксации заряда в базе диода, состояла из генератора прямого напряжения и обратного напряжения с амплитудой до 75 в. В качестве генераторов использовались ГНИ-1 с фронтами $1,5 \div 3$ нсек. Величину задержки можно было плав-

но менять от нуля до 100 нсек и декадно по 100 нсек. Наблюдение производилось с помощью осциллографа С1-10.

Измерение величин зарядов производилось по увеличенным в масштабе осциллограммам.



Фиг. 1. Схема в установке для определения величины накопленного в диоде заряда.



Фиг. 2. Схема для снятия времени релаксации заряда в базе диода.

Используемые для измерения диоды имели собственную емкость конструкции 0,8—1,2 пф. при $U_{обр} \geq 1$ в из-за высокоомности базового материала и пробивные напряжения порядка 150—200 в. Диоды изготавливались из *n*-типа кремния, компенсированного золотом до удельных сопротивлений от нескольких до многих десятков килоом. см, что касается этого типа диодов, то время жизни дырок может быть рассчитано по формуле:

$$\tau_p = \frac{1,27 \cdot 10^8}{N_{Au^-}} \text{ [сек]}, \quad (7)$$

где N_{Au^-} — концентрация отрицательно заряженных атомов золота на уровне 0,54 эв.

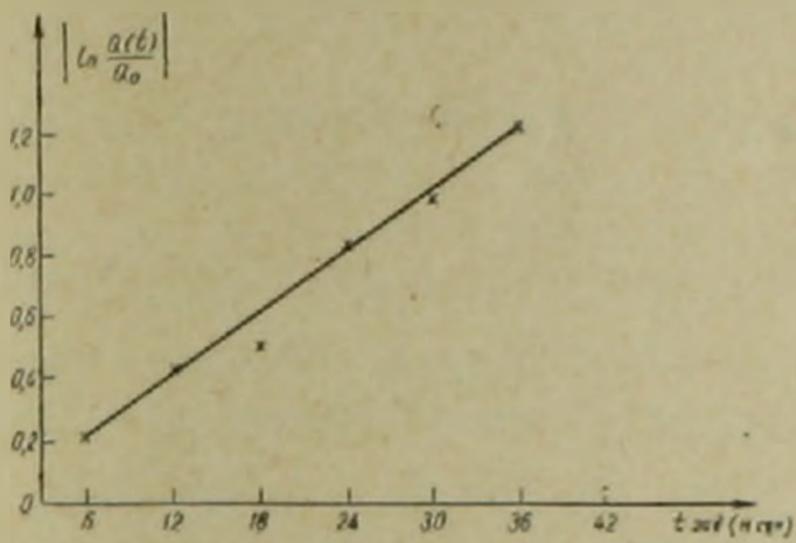
Эта величина определялась по условию компенсации: $N_{Au^-} \approx N_0$ исходного материала.

Измеряемые величины заряда зависели от величины обратного напряжения и примерно при 50—60 в насыщались. За измеряемую величину мы выбирали величину заряда, соответствующую этому напряжению.

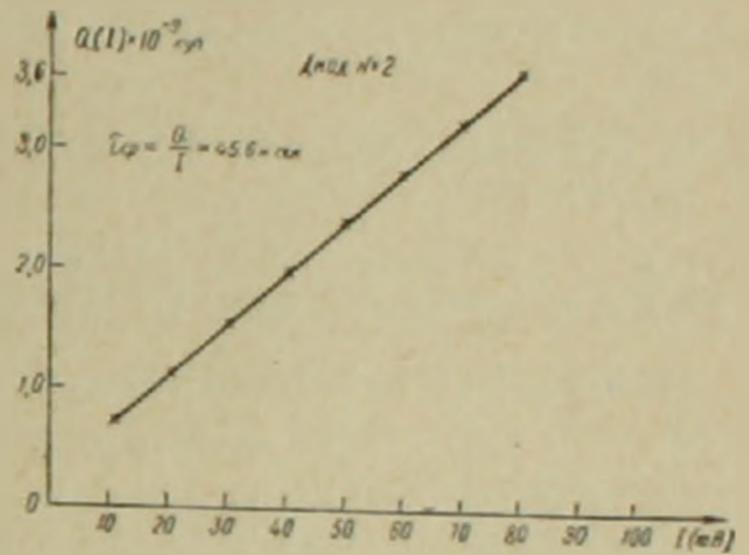
На фиг. 3 представлена зависимость $\left| \ln \frac{Q(t)}{Q(0)} \right|$ как функция времени задержки между концом импульса прямого тока и моментом включения обратного напряжения для диода, изготовленного из кремния *n*-типа с удельным сопротивлением 0,7 ÷ 0,9 ом. см, компенсированного золотом. Значение τ_p — порядка 30 нсек, что неплохо совпадает с расчетом по формуле (7) для выбранного исходного материала.

На фиг. 4 представлена зависимость $Q(0)$ как функция прямого тока для диода, изготовленного из материала с исходным удельным сопротивлением 2 ом. см, коопенсированного золотом. Значение τ_p равно 45,6 нсек. Точки хорошо ложатся на прямую линию, что говорит об отсутствии модуляции времени жизни неосновных носителей до тока 80 мА; площадь переходов была порядка 10^{-3} см². Нами предпринята попытка измерения $Q(0)$ в зависимости от величины прямого тока для диодов с отрицательным сопротивлением на кремнии *n*-типа, компенс-

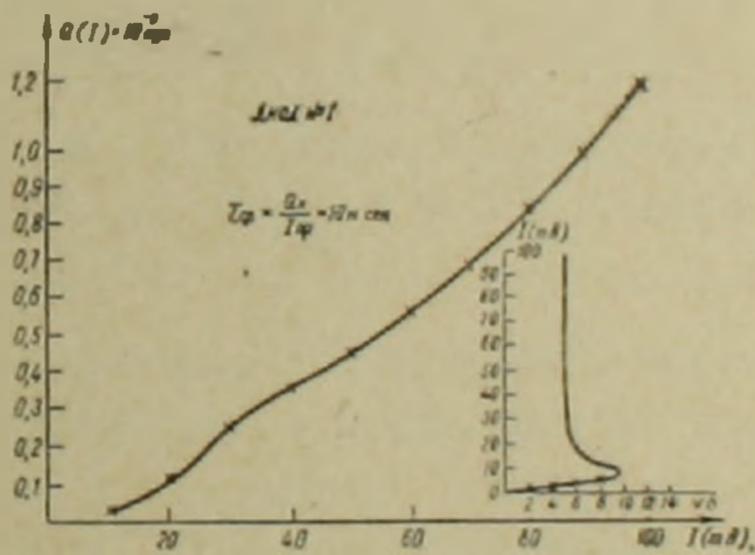
рованного золотом. Измеренные значения за вычетом емкостной составляющей показаны на фиг. 5 вместе с вольт-амперной характеристикой диода. К сожалению, метод определения заряда по осциллограммам допускает ошибку порядка 20—30% в сторону занижения измеряемой величины, так что можно говорить в данном случае о временах порядка 10—13 ксек для $Sic_{\text{исх}} = 0,4 \text{ ом см}$. Длительность рассасывания измерялась в пределах от двух до шести наносекунд. В результате можно говорить об изменении τ_p до полутора раз. Надо учесть, что измеряемое τ_p есть среднее по объему проводящего участка базы, так что не исключено увеличение τ_p до двух раз — это максимально возможное изменение τ_p в случае комнатной температуры, поскольку $\tau_{no} = 2\tau_{po}$ (τ_{po} и τ_{no} — сечение захвата дырок и электронов соответственно на уровне 0,54) — вблизи $p-i$ перехода.



Фиг. 3. Зависимость $\left| \ln \frac{Q(t)}{Q(0)} \right|$ от времени задержки.



Фиг. 4. $Q(t)$ как функция прямого тока.



Фиг. 5. Вольт-амперная характеристика и $Q(t)$, как функция прямого тока.

Любопытно отметить, что методика измерения зависимости $Q(t)$ от тока для определения времен жизни дырок не требует учета детального распределения тока по сечению базы, так как в виду наличия шнуровых эффектов, что имеет место в случае кремниевого диода с отрицательным сопротивлением (будет опубликовано), периферия проводящего участка в случае сильной декомпенсации материала в месте протекания

ния тока может исказить измеряемую величину. Этим недостатком обладают все методы, основанные на измерении послепежекционных процессов в диодах.

Используемые методики позволяют измерить времена наносекундного диапазона. При наличии чувствительного высокочастотного индикатора методика может помочь разобраться в явлении отрицательного сопротивления в диодах из кремния, германия, А³, Ga и других материалов. Необходимо отметить, что после написания статьи нам стало известно о применении таких же методов измерений для других диодов (2).

Правда, из работы неясно, были ли исследуемые диоды «длинными».

Авторы благодарят А. А. Краснова, Л. С. Хавина за помощь в работе.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Армянской ССР

Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ. Հայկական ՍՍՀ ԳԱ րդրակից-անդամ, Ի. Ռ. ԱՆՏԻԱՆ և Ա. Վ. ՅՈՒՐՈՎԻՍԻ

Նանովարկյանային կյանքի տևողության չափումները «Երկար» դիոդներում

Նկարագրվում է նանովարկյանային կյանքի տևողության չափման մեթոդիկան «Երկար» դիոդներում, որը հիմնված է դիոդի բազայում ուղիղ հոսանքի անցման ժամանակ ամբողջ խոռոչային լիցքի չափման վրա:

Բացի նշվածից առաջարկվում է կյանքի տևողության չափման մեթոդը, որը նման է ինֆրակարմիր ֆոտոհաղորդականության անկման չափումներին, սակայն, հաղորդականության չափումը փոխարինվում է լիցքի չափումով որպես ժամանակի ֆունկցիա:

Բերվում են ոսկիով կոմպենսացված կրեմնիումի դիոդներում կյանքի տևողությունը չափող սխեմաները և չափման արդյունքները:

ЛИТЕРАТУРА — Գ Ր Ա Վ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ Ю. Р. Носов. „Радиотехника и электроника“ № 12, 1964. ² C. F. Fell, W. A. Johnson, Effective Lifetime. A Figure of Merit for nanosecond Diodes (IEEE Trans. ED).