

06;12

Нестационарная спектроскопия поверхностных состояний в режиме постоянного подпорогового тока МДП транзистора

© М.Н. Левин, Е.Н. Бормонтов, А.В. Татаринцев, В.Р. Гитлин

Воронежский государственный университет,
394693 Воронеж, Россия

(Поступило в Редакцию 27 мая 1998 г.)

Реализован метод исследования спектра поверхностных состояний на границе раздела полупроводник–диэлектрик по релаксации напряжения на затворе МДП транзистора, измеряемого в режиме постоянного подпорогового тока. Предлагаемый метод обеспечивает возможность исследования этих состояний в обеих половинах запрещенной зоны полупроводника и удобен для тестового контроля интегральных схем. Возможности метода проиллюстрированы на примере определения радиационно-стимулированных изменений спектра поверхностных состояний.

Анализ релаксационных процессов, обусловленных перезарядкой неравновесно заполненных поверхностных состояний (ПС), является эффективным средством исследования границы раздела диэлектрик–полупроводник. Симмонс и Вей [1] первыми показали возможность прямого определения плотности ПС по нестационарным токам в структуре металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) при переключении ее из обогащения в глубокое обеднение. При этом авторы пренебрегли влиянием изменения глубины области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника, ограничив применимость метода условием $C_i \gg C_{sc}$, где C_i и C_{sc} — емкости диэлектрика и полупроводника соответственно. Это ограничение устранено в методе Джонсона нестационарной спектроскопии ПС в режиме постоянной емкости (Constant Capacitance — DLTS или CC-DLTS) [2]. Такой режим обеспечивает постоянство глубины ОПЗ в процессе релаксации и исключает влияние полупроводника на результаты измерений. Метод постоянной емкости позволяет исследовать ПС в половине запрещенной зоны, прилегающей к зоне основных носителей заряда. Трудности в исследовании возникают в середине запрещенной зоны из-за появления токов поверхностной генерации, вызванных неконтролируемым накоплением неосновных носителей на поверхности в конденсаторной МДП структуре [2]. Избежать генерации поверхностных токов позволяет проведение исследований в МДП транзисторах с обратными смещенными переходами истока и стока, препятствующими накоплению неосновных носителей у поверхности [3]. В случае измерений в МДП транзисторе удастся также достичь предельной чувствительности методов нестационарной спектроскопии за счет использования их собственного усилительного эффекта. Заметим, что при исследовании нестационарной перезарядки ПС в МДП элементах больших интегральных схем (БИС) с малыми размерами постоянно глубины ОПЗ проще обеспечить поддержанием постоянной величины стокового тока, а не емкости затвора. В работе [4] в таком режиме (при постоянном стоковом токе) измерялась релаксация затворного напряжения V_g открытого МДП транзистора, величина которого превышала величину порогового напряжения

V_T . При этом авторам [4] удалось зарегистрировать перезарядку дискретных ПС в МДП транзисторе размером $1 \times 1 \mu\text{m}$. Однако поддержание постоянного стокового тока открытого транзистора позволило исследовать ПС только вблизи зоны неосновных носителей.

В настоящей работе реализован метод исследования спектра ПС по релаксации напряжения на затворе МДП транзистора в режиме постоянного подпорогового тока. Предлагаемый вариант обеспечивает возможность исследования ПС в обеих половинах запрещенной зоны полупроводника.

Теоретическая часть

Для определенности рассмотрим p -канальный МДП транзистор. В данном транзисторе спектр ПС в верхней половине запрещенной зоны (прилегающей к зоне основных носителей полупроводниковой подложки транзистора) исследуется по релаксации $V_g(t)$ при его переключении из обогащения в состояние начала слабой инверсии. В состоянии начала инверсии квазиуровень Ферми неосновных носителей E_{Fp} на поверхности расположен вблизи середины запрещенной зоны, поверхностный изгиб зон ψ_s равен объемному потенциалу полупроводника φ_B , а соответствующее напряжение на затворе транзистора V_{mg} может быть названо напряжением "середины зоны". ПС в нижней половине запрещенной зоны (прилегающей к зоне неосновных носителей) исследуются по релаксации $V_g(t)$ при переключении МДП транзистора из сильной инверсии в состояние "середины зоны". Напряжение на стоке должно быть достаточно большим, чтобы обеспечить режим насыщения стокового тока. При насыщении тока по напряжению на стоке в области слабой инверсии поверхность полупроводника является эквипотенциальной практически по всей длине канала [5]. Это позволяет рассматривать процесс релаксации заряда на ПС в одномерном приближении.

При переключении МДП транзистора из обогащения в инверсию перезарядка ПС обусловлена двумя процессами: эмиссией электронов с ПС в зону проводимости и

захватом (рекомбинацией) свободных дырок на ПС. Кинетика изменения заряда на поверхностных состояниях $Q_{it}(t)$ определяется уравнением

$$Q_{it}(t) = q \int_{E_{Fp}}^{E(t)} D_{it}(E) \exp[-(e_n + c_p)t] dE, \quad (1)$$

где q — заряд электрона, $D_{it}(E)$ — плотность ПС, e_n и c_p — коэффициенты эмиссии электронов и захвата (рекомбинации) дырок соответственно, E_{Fp} — положение квазиуровня Ферми неосновных носителей в полупроводнике, $E(t)$ — энергетический уровень ПС в момент времени t .

Коэффициент эмиссии электронов с ПС определяется их энергетическим положением

$$e_n = \sigma_n v_{th} n_i \exp\left(\frac{E - E_i}{kT}\right), \quad (2)$$

а коэффициент захвата — концентрацией свободных дырок и может быть выражен через положение квазиуровня Ферми E_{Fp}

$$c_p = \sigma_p v_{th} n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right). \quad (3)$$

Здесь n_i — собственная концентрация носителей в полупроводнике, v_{th} — тепловая скорость, σ_n и σ_p — сечение захвата ПС для электронов и дырок соответственно, E_i — уровень Ферми в собственном полупроводнике, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Равенство коэффициентов эмиссии и рекомбинации определяет положение демаркационного уровня E_D , выше которого ПС разряжаются в основном за счет эмиссии, а ниже — за счет рекомбинации

$$E_D - E_i = E_i - E_{Fp} + kT \ln(\sigma_p / \sigma_n). \quad (4)$$

Эмиссия электронов в зону проводимости происходит последовательно по мере увеличения глубины энергетического положения ПС. При этом энергетический уровень ПС, с которого происходит эмиссия электронов в момент времени t , определяется с известным соотношением [1]

$$E(t) = E_i - kT \ln(\sigma_n v_{th} n_i t). \quad (5)$$

Время t отсчитывается от момента переключения МДП транзистора из обогащения в слабую инверсию. Из (3)–(5) следует, что момент времени t_D , в который эмиссия электронов достигает ПС, расположенных на демаркационном уровне энергии E_D , обратно пропорционален коэффициенту захвата дырок

$$t_D = c_p^{-1}. \quad (6)$$

С учетом (3)–(6) уравнение (1), описывающее изменение заряда на ПС, можно записать в виде

$$Q_{it}(t) = q \exp\left(-\frac{t}{t_D}\right) \int_{E_{Fp}}^{E(t)} D_{it}(E) dE. \quad (7)$$

При поддержании в процессе релаксации МДП транзистора постоянной величины стокового тока изменение напряжения на затворе определяется только перезарядкой ПС, т.е. кинетикой изменения заряда $O_{it}(t)$,

$$V_g(t) = V_{g0} - \frac{Q_{it}(t)}{C_i}, \quad (8)$$

где V_{g0} — напряжение на затворе в момент времени $t = 0$, обеспечивающее протекание выбранной величины постоянного тока в условиях стационарного обогащения канала транзистора; $C_i = \epsilon_i / d_i$ — геометрическая емкость подзатворного диэлектрического слоя; ϵ_i — абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, d_i — его толщина.

Уравнения (7) и (8) позволяют выразить плотность ПС через значения напряжения на затворе $V_g(t)$ и его производную по времени $dV_g(t)/dt$ в момент времени t , связанный соотношением (5) с энергетическим положением ПС,

$$D_{it}(t) = \frac{C_i}{qkT} \exp\left(\frac{t}{t_D}\right) \left[\frac{V_{g0} - V_g(t)}{t_D} - \frac{dV_g(t)}{dt} \right] t. \quad (9)$$

Система уравнения (5) и (9) обеспечивает возможность определения энергетического распределения плотности ПС в верхней половине запрещенной зоны по релаксационным зависимостям напряжения на затворе, измеряемого в режиме постоянного подпорогового тока. Верхний и нижний пределы доступного для исследования энергетического интервала определяются по формуле (5) минимальным временем измерения и демаркационным уровнем энергии E_D соответственно.

Для практической реализации методики необходимо предварительно определить демаркационное время t_D и сечение захвата основных носителей σ_n . Заметим, что с учетом (7) соотношение (8) можно записать следующим образом:

$$V_g(t) = V_{g\infty} - \frac{q}{C_i} \exp\left(-\frac{t}{t_D}\right) \int_{E_i}^{E(t)} D_{it}(E) dE, \quad (10)$$

где $V_{g\infty}$ — конечное стационарное значение затворного напряжения $V_g(t \rightarrow \infty)$, определяемое выражением

$$V_{g\infty} = V_{g0} - \frac{q}{C_i} \int_{E_i}^{E_{Fp}} D_{it}(E) dE. \quad (11)$$

Логарифмируя соотношение (10), получаем

$$\ln \left[\frac{C_i (V_{g\infty} - V_g(t))}{q} \right] = -\frac{t}{t_D} + \ln \int_{E_i}^{E(t)} D_{it}(E) dE. \quad (12)$$

Построив релаксационную кривую в координатах

$$\ln \left[\frac{C_i (V_{g\infty} - V_g(t))}{q} \right] = f(t),$$

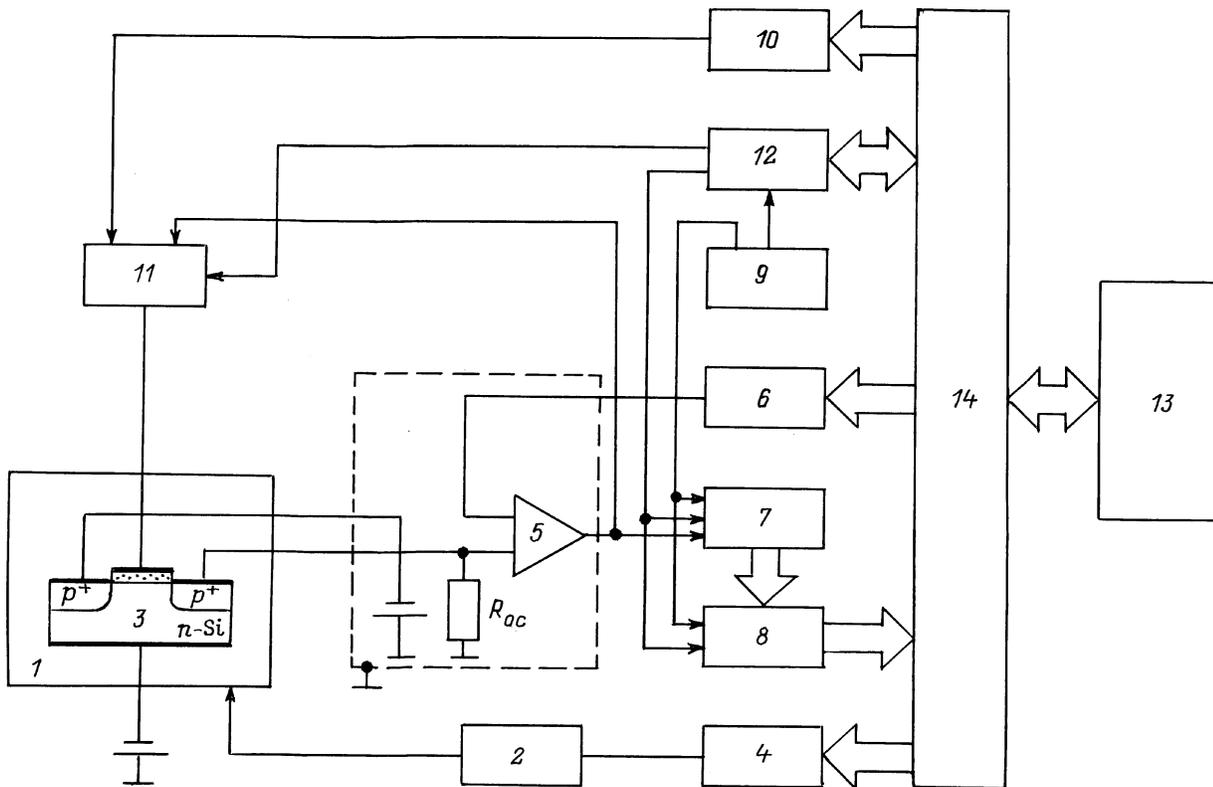


Рис. 1. Блок-схема установки для нестационарной спектроскопии поверхностных состояний в режиме подпорогового тока насыщения.

из наклона полученной зависимости можно определить значение t_D . Затем, численно дифференцируя релаксационную кривую $V_g(t)$, при каждой фиксированной температуре по формуле (9) вычисляются значения D_{it} , соответствующие моментам времени $t < t_D$.

Для нахождения сечения захвата основных носителей σ_n по полученным зависимостям $D_{it}(t)$ определяются соответствующие значения температуры и времени, удовлетворяющие условию $D_{it} = \text{const}$ (см. вставку на рис. 2), т.е. точки t_1 и t_2 для кривых, снятых при температурах T_1 и T_2 соответственно. Используя полученные значения t_i и T_i , можно построить зависимость $\ln(v_{th}n_i t) = f(1/kT)$, которая в предположении $\sigma_n = \text{const}$ является прямой линией, и по наклону этой прямой определить сечение захвата σ_n . Нижняя часть запрещенной зоны исследуется при переключении МДП транзистора из области сильной инверсии в состояние "середины зоны". Напряжение "середины зоны" V_{mg} определялось по теоретическому значению подпорогового тока I_{mg} в соответствии с известной методикой [6]. Перезарядка ПС в этом случае определяется единственным механизмом — эмиссией дырок с ПС в валентную зону. Уравнение (9) преобразуется к простому виду

$$D_{it}(t) = -\frac{C_i(t)}{qkT} \frac{dV_g(t)}{dt}. \quad (13)$$

Здесь энергия и время связаны следующим соотношением [1]:

$$E(t) = E_i + kT \ln(\sigma_p v_{th} n_i t). \quad (14)$$

Отметим также, что для определения сечения захвата неосновных носителей σ_p достаточно одной релаксационной кривой, измеренной при фиксированной температуре. Таким образом, система уравнений (13) и (14) дает спектр ПС в нижней половине запрещенной зоны полупроводника.

Измерительная установка

Блок-схема установки для нестационарной спектроскопии ПС в режиме насыщения подпорогового тока приведена на рис. 1. В состав установки входят следующие функциональные блоки.

1) Вакуумный криостат (1) с блоком управления температурой (2), который обеспечивает поддержание температуры образца (3) от 80 до 723 К с точностью до 0.5 К, задание опорного напряжения для этого блока осуществляется с помощью цифроаналогового преобразователя ЦАП1 (4) на базе интегральной схемы (ИС) КР594ПА1.

2) Генератор тока на быстродействующем операционном усилителе К574УД2 (5), обеспечивающий динамическое поддержание постоянного подпорогового тока.

Уровень тока определяется значением опорного напряжения, задаваемого ЦАП2 (6) на основе ИС КР594ПА1, и может достигать 10^{-10} А.

3) Быстродействующий 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (7), собранный на 8-разрядных АЦП К1107ПВ4 со временем выборки 10^{-8} с, с помощью которого измеряется релаксация напряжения на затворе МДП транзистора, обусловленная перезарядкой ПС.

4) Буферное оперативное запоминающее устройство (БОЗУ) (8), служащее для предварительной записи данных из АЦП с последующей передачей в ЭВМ. БОЗУ емкостью 10×1024 бит реализовано на базе статического ОЗУ ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) типа К1500РУ415 со временем выборки не более $2 \cdot 10^{-8}$ с.

5) Генератор тактовых импульсов (9), собранный на дискретных элементах ЭСЛ, с помощью которого осуществляется стробирование АЦП и БОЗУ.

6) ЦАП3 (10) КР594ПА1, с помощью которого задаются параметры импульсов смещения, подаваемых на затвор МДП транзистора.

7) Быстродействующий электронный ключ (11), обеспечивающий коммутацию сигналов, подаваемых на затвор МДП транзистора.

8) Программируемый от ЭВМ таймер (12), собранный на БИС КР580ВИ53, с помощью которого осуществляется временная диаграмма процесса измерения (задание временных параметров импульса смещения, управление ключевым устройством, АЦП и БОЗУ).

9) МикроЭВМ "Электроника-60" (13), с помощью которой осуществляется управление процессом измерения и обработка результатов.

10) Устройство согласования (14), осуществляющее связь измерительного блока с микроЭВМ.

Установка работает следующим образом. По достижении заданной температуры на затвор транзистора подается импульс напряжения, переводящий поверхность в подзатворной области в состояние обогащения или инверсии (в зависимости от исследуемой половины запрещенной зоны полупроводника). При этом ключевое устройство отключает цепь обратной связи, обеспечивающую поддержание постоянного подпорогового тока. После установления стационарного состояния (не более 0.01 с) напряжение смещения снимается и включается цепь обратной связи, которая восстанавливает и поддерживает заданный уровень подпорогового тока за счет изменения напряжения на затворе МДП транзистора. По окончании переходного процесса (не более $5 \cdot 10^{-8}$ с), определяемого быстродействием операционного усилителя в генераторе тока, с помощью быстродействующего АЦП начинается измерение релаксации напряжения на затворе МДП транзистора, обусловленной перезарядкой ПС, и последующая запись данных в БОЗУ. Время выборки АЦП может меняться от $2 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-3} с на разных участках релаксационной кривой. По заполнении БОЗУ либо по окончании измерения кривой данные считываются в ЭВМ. Затем измерение повторяется при

данной или другой температуре. Время, необходимое для измерения одной релаксационной кривой, составляет не более 0.02 с при записи данных в ОЗУ ЭВМ и не более 0.1 с при записи данных на диск.

Экспериментальные результаты

Предложенный метод был применен для определения радиационно-стимулированных изменений спектра ПС. Измерения проводились на *p*-канальном МДП транзисторе с толщиной подзатворного окисла $d_{ox} = 98$ нм, длиной канала $L = 3$ мкм, шириной канала $W = 100$ мкм, уровнем легирования подложки $n_0 = 10^{14}$ см⁻³. Энергетический спектр ПС изменяли воздействием мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов $E_x = 20$ кеВ, дозой до 10^6 R и последующим низкотем-

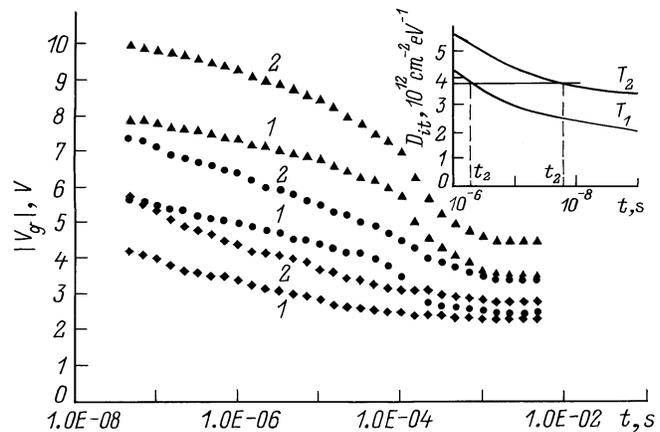


Рис. 2. Релаксационные зависимости $V_g(t)$, измеренные при переключении МДП транзистора в слабую инверсию из обогащения (\bullet — $T = 300$ К, \blacktriangle — $T = 250$ К) и из сильной инверсии (\blacklozenge — $T = 300$) после рентгеновского облучения: $D = 10^5$ (1), $5 \cdot 10^5$ R (2).

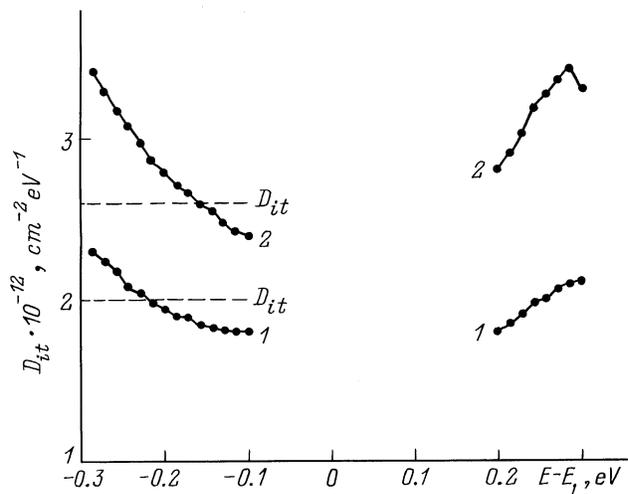


Рис. 3. Энергетические спектры плотности поверхностных состояний после рентгеновского облучения (1, 2 — то же, что и на рис. 2).

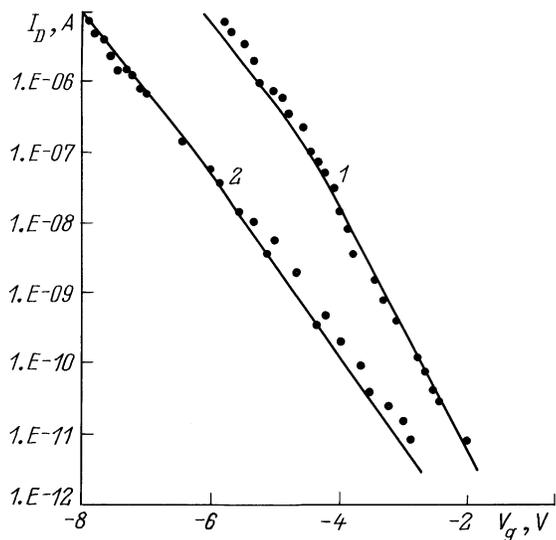


Рис. 4. Подпороговые участки сток-затворных ВАХ p -канальных транзисторов после рентгеновского облучения (1, 2 — то же, что и на рис. 2).

пературным отжигом при температуре 723 К. Облучение проводилось на рентгеновской установке ИРИС-МЗ.

Типичные релаксационные зависимости $V_g(t)$ указанных МДП транзисторов, измеренные в режиме подпорогового тока насыщения после рентгеновского облучения дозами 10^5 Р и $5 \cdot 10^5$ Р, представлены на рис. 2. Рассчитанные на основе приведенных экспериментальных данных энергетические спектры плотности ПС $D_{it}(E)$ представлены на рис. 3.

Рассчитанные предложенным методом спектры ПС сопоставимы с данными, полученными на этих же образцах хорошо известным методом стационарных подпороговых токов [7]. Измерения стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились на установке, описанной в [8]. Напомним, что стационарная сток-затворная ВАХ длинноканального МДП транзистора в подпороговой области описывается уравнением [7]

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{V_g - V_T}{S}\right), \quad (15)$$

где

$$S = \frac{kT}{q} \frac{C_i + C_{sc} + C_{ss}}{C_i};$$

C_{ss} — емкость, обусловленная перезарядкой ПС.

Изменения ВАХ, вызываемые рентгеновским облучением, показаны на рис. 4.

Усредненная плотность ПС D_{it} рассчитывается по параметру S , экспериментально определяемому из наклона зависимости $\ln(I_D/I_0)$ от V_g ,

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left[C_i \left(\frac{qS}{kT} - 1 \right) - C_{sc} \right]. \quad (16)$$

Усредненные значения плотности ПС D_{it} , определенные из кривых рис. 4 по формуле (16), показаны

на рис. 3 штриховой линией и составляют $2 \cdot 10^{12}$ и $2.6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ для доз облучения 10^5 и $5 \cdot 10^5$ Р соответственно и хорошо согласуется с данными предложенного метода.

Таким образом, метод исследования спектра ПС на границе раздела диэлектрик–полупроводник по релаксации напряжения на затворе МДП транзистора в режиме постоянного подпорогового тока обеспечивает возможность исследования ПС в обеих половинах запрещенной зоны полупроводника и удобен для тестового контроля интегральных схем.

Список литературы

- [1] Simmons J.G., Wei L.S. // Sol. St. Electron. 1974. Vol. 17. P. 117–119.
- [2] Johnson M.N.J. // Vac. Sci. Technol. 1982. Vol. 21. P. 303–315.
- [3] Wang K.L. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. Vol. ED-27. P. 2231–2239.
- [4] Karwath A., Schulz M. // Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 52. P. 634–637.
- [5] Van Overstraeten R.J., Declerck G.J., Muls P.A. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1975. Vol. ED-22. P. 282–288.
- [6] Ms Whorter P.J., Winokur P.S. // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 48. P. 133–137.
- [7] Zu С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984. Т. 2. 456 с.
- [8] Левин М.Н., Израйлит В.Л., Татаринцев А.В., Кадменский С.Г. // ПТЭ. 1992. № 2. С. 119–122.