

2. Маклюков М. И. Инженерный синтез активных RC-фильтров низких и инфранизких частот.— М.: Энергия, 1971.  
 3. Богданов Г. Б. Частотно-избирательные системы на ферритах и применение их в технике СВЧ.— М.: Сов. радио, 1973.  
 4. Ильченко М. Е., Мелков Г. А., Мирских Г. А. Твердотельные СВЧ фильтры.— Киев: Техника, 1977.  
 5. Знаменский А. Е., Попов Е. С. Перестраиваемые электрические фильтры.— М.: Связь, 1979.  
 6. Маттей Д. А., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи.— М.: Связь, 1971.  
 7. Dambrine G., Carpy A., Heliodore F., Playez E. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit // IEEE Trans. Microwave Theory Tech.— 1988.— Vol. MTT-36.— P. 1151—1159.

8. Rohde U. L. Improving noise modeling of GaAs FETs. Part 1: Using an enhanced equivalent circuit technique // Microwave Journal.— 1991.— Vol. 34.— P. 87—101.  
 9. Magerko M. A., Chang K. Modeling of Gunn domain effects in the output conductance of the high-frequency small-signal GaAs MESFET equivalent circuit // Microwave and Optical Technology Letters.— 1992.— Vol. 5.— P. 748—752.  
 10. Lenk F., Doerner R., Heymann P. Negative resistance in GaAs MESFET nonlinear modelling // IEEE Trans. Microwave Theory Tech.— 1996.— Vol. MTT-40.— P. 2258—2266.  
 11. Куликовский А. А. Устойчивость активных линеаризованных цепей с усилительными приборами новых типов.— М.: Госэнергоиздат, 1962.  
 12. Филинюк Н. А. Активные СВЧ-фильтры на транзисторах.— М.: Радио и связь, 1987.

К. ф.-м. н. Г. К. НИИДЗЕ, к. ф.-м. н. С. П. ПАВЛЮК,  
 к. ф.-м. н. Л. В. ИЩУК, В. В. КУШНИРЕНКО

Украина, Киевский национальный университет  
 им. Тараса Шевченко  
 E-mail: pps@univ.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
 18.01 2005 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО  
 (Институт микроприборов, г. Киев)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КНИ-ТРАНЗИСТОРА В КАЧЕСТВЕ ГЕНЕРАТОРА КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

*Предложено использование транзистора, изготовленного по технологии "кремний-на-изоляторе", в качестве генератора релаксационных и квазигармонических колебаний регулируемой частоты и амплитуды.*

В последние годы большое внимание привлекают к себе полупроводниковые приборы, изготовленные по технологии "кремний-на-изоляторе" (КНИ) [1], в том числе и транзисторы — одни из ключевых элементов, которые используются в генераторах колебаний.

Обычно КНИ-транзисторы исследуются или в режиме малых токов, или в подпороговом режиме работы. В отличие от такого подхода, в [2] впервые проведены исследования поведения КНИ-транзистора при протекании экстремально больших токов стока. При этом транзисторы питались от генератора напряжения. В этих условиях в электрической цепи наблюдались колебания тока большой частоты и амплитуды, причем форма и частота этих колебаний почти не зависели ни от величины напряжения на стоке  $U_c$ , ни от напряжения смещения между подложкой и каналом транзистора  $U_{п}$ .

В [3] описаны результаты исследования этих же транзисторов при их питании от генератора тока. Изменение способа питания позволило впервые обнаружить S-образные участки на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) КНИ-транзисторов, а также зарегистрировать одновременно с колебаниями тока через транзистор колебания напряжения на нем.

Целью данной работы было исследование вида колебаний тока и напряжения на транзисторах, которые питаются в режиме, близком к генератору тока, и определение частотных, амплитудных и модуляционных характеристик в зависимости от протекающего тока  $I$  и потенциала подложки  $U_{п}$ .

### Конструкция КНИ-транзистора и методика измерений

На рис. 1 приведено схематическое изображение исследуемого транзистора и схема включения его в электрическую цепь. Представленные в работе результаты получены на транзисторах, в которых длина пленки кремния  $n$ -типа составляла 10 мкм, ширина — 50 мкм. Планарные размеры пленки на полученные результаты существенно не влияли. Толщина кремниевой пленки, встроенного оксида кремния и кремниевой подложки составляла соответственно 0,4, 1 и 400 мкм.

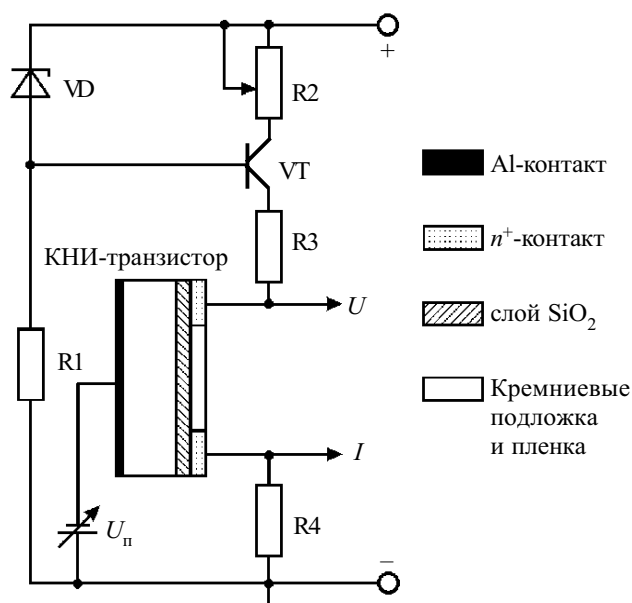


Рис. 1. КНИ-транзистор и схема его включения в измерительную цепь

Исток транзистора был всегда соединен с "землей" через малое сопротивление R4. Роль затвора транзистора при приведенном на рис. 1 включении играла подложка. Между ней и "землей" можно было прикладывать смещение  $U_{\text{п}}$  любой полярности, а также заземлять ее.

В схеме питания VT — это транзистор, регулирующий величину протекающего в цепи тока. Цепочка, состоящая из диода VD и резистора R1, обеспечивает рабочую точку транзистора, резистор R2 задает ток в цепи КНИ-транзистора, R3 — ограничительный резистор. С резистора R4 снимался сигнал, пропорциональный току, протекающему через КНИ-транзистор.

### Колебания тока и напряжения

На рис. 2 (кривая 1) приведена стационарная ВАХ КНИ-транзистора при закороченных подложке и истоке ( $U_{\text{п}}=0$ ).

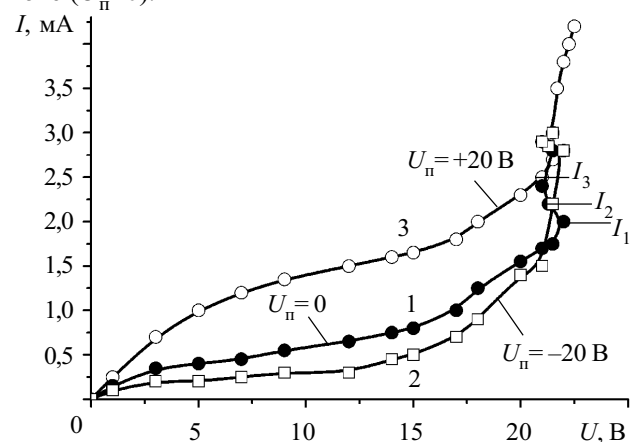


Рис. 2. ВАХ КНИ-транзистора при различном смещении на подложке относительно истока транзистора

Участок ВАХ со значениями токов в диапазоне от 0 до  $I_1$  является классической ВАХ полевого транзистора [4, т. 2, с. 13–21]. Вначале она линейна, а с увеличением тока наблюдается насыщение, связанное с образованием области обеднения вблизи стока транзистора.

Начиная от токов  $I > I_1$  на ВАХ наблюдался S-образный участок, на котором одновременно возникали колебания тока и напряжения на транзисторе. Для построения этого участка использованы средние значения тока  $I$  и напряжения  $U$ , полученные путем электрического интегрирования колебаний тока и напряжения.

Подача смещения между истоком и подложкой вызывала смещение ВАХ, не изменяя качественного характера зависимостей. При подаче на подложку напряжения  $U_{\text{п}} = -20$  В (кривая 2) при одних и тех же значениях  $I$  ВАХ смещалась в сторону больших значений  $U$  по сравнению со случаем  $U_{\text{п}} = 0$ , а при подаче  $U_{\text{п}} = +20$  В — в сторону меньших значений.

Согласно определению идеального генератора тока заданный ток в нем не может меняться при изменении нагрузки. Колебания тока в использованном источнике связаны с очень быстрым изменением ( $< 1$  мкс) сопротивления исследуемого транзистора. Транзистор VT (рис. 1) не успевал своевременно обрабатывать эти изменения, и на S-образном участке ВАХ источник питания работал в гибридном режиме.

Частота, форма и амплитуда колебаний были целиком воспроизводимы при изменении тока  $I$  в ин-

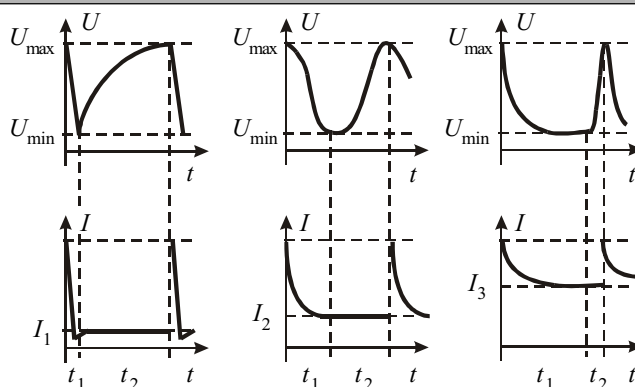


Рис. 3. Осциллограммы колебаний напряжения и тока в КНИ-транзисторе при различных токах источника питания  $I_1 < I_2 < I_3$

тервале значений от  $I_1$  до  $I_3$ . Существенное превышение значения  $I_3$  приводило к необратимому изменению свойств прибора. Поэтому все приведенные далее результаты получены при условии, что ток через транзистор практически не превышал значения  $I_3$ .

На рис. 3 приведены осциллограммы колебаний тока  $I$ , протекающего через транзистор, и напряжения  $U$  на его стоке, полученные при разных значениях заданного тока  $I_1, I_2, I_3$  (см. рис. 2) и  $U_{\text{п}} = 0$ .

Увеличение тока  $I$  сопровождалось изменением формы колебаний. При токе  $I_1$  на структуре возникают колебания  $U(t)$  релаксационного типа; за время  $t_1$  напряжение  $U(t)$  быстро уменьшается от максимального значения  $U_{\text{max}}$  до  $U_{\text{min}}$ , после чего за время  $t_2$  почти по экспоненте растет до исходного значения  $U_{\text{max}}$ . При этом  $t_1 \ll t_2$ .

Увеличение тока  $I$  от  $I_1$  до  $I_2$  сопровождалось увеличением  $t_1$ , уменьшением  $t_2$  и приближением к соотношению  $t_1 \approx t_2$ . При этом колебания  $U(t)$  становились квазигармоническими. Дальнейший рост тока от  $I_2$  до  $I_3$  вновь превращал колебания  $U(t)$  в релаксационные и приводил к неравенству  $t_1 \gg t_2$ . Превышение тока  $I$  сверх  $I_3$  приводило к срыву колебаний. Заметим, что при изменениях тока в диапазоне  $I_1 < I < I_3$  колебаниям  $U(t)$  сопутствуют колебания тока  $I(t)$  в виде пиков (рис. 3), которые обычно наблюдаются при перезарядке RC-цепочек ( $R$  — сопротивление,  $C$  — емкость).

Увеличение тока  $I$  через транзистор приводило к изменению частоты колебаний  $f$ , амплитуды напряжения  $\Delta U = U_{\text{max}} - U_{\text{min}}$ , коэффициента модуляции  $M = (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) / U_{\text{max}}$ . Эти зависимости показаны на рис. 4 при  $U_{\text{п}} = 0$  кривыми 1. Как видим, частота возникающих при  $I > I_1$  колебаний (рис. 4, а), которые носят релаксационный характер, вначале растет с увеличением  $I$  и становится максимальной ( $\approx 1$  МГц) при  $I_2$ , когда колебания приобретают квазигармонический характер. Затем частота вновь падает, и колебания становятся релаксационными, исчезая при  $I > I_3$ .

На рис. 5 представлены результаты исследования стабильности частоты возникающих колебаний напряжения на КНИ-структуре при различных токах источника питания. Видно, что с ростом тока от  $I_1$  к  $I_3$  стабильность колебаний во времени существенно ухудшается.

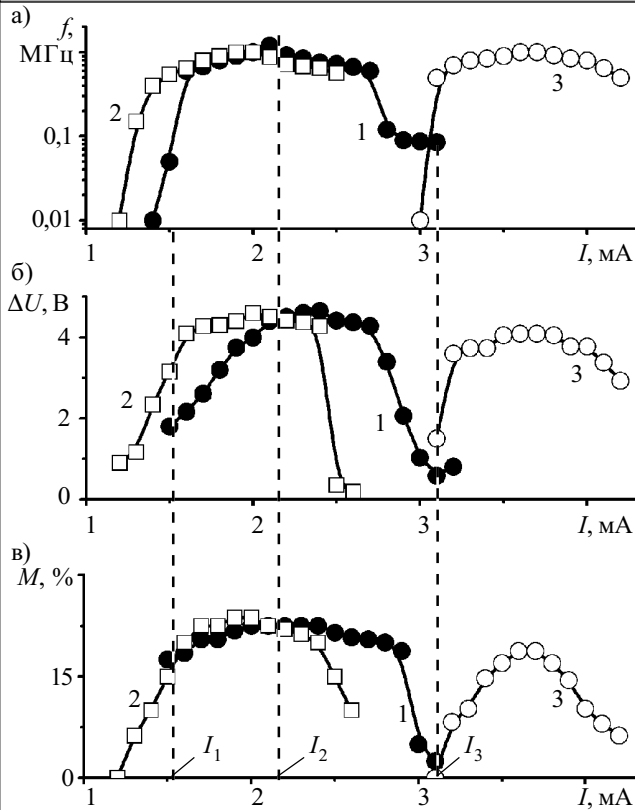


Рис. 4. Зависимости частоты  $f$  (а), амплитуды колебаний напряжения  $\Delta U$  (б) и коэффициента модуляции  $M$  (в) от тока, протекающего через КНИ-транзистор, при различном смещении на подложке относительно истока транзистора  $U_{г}^{\pm}$ : 1 — 0 В; 2 — -20 В; 3 — +20 В

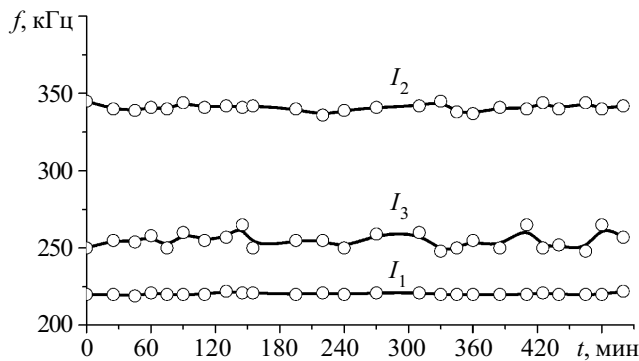


Рис. 5. Стабильность частоты генератора во времени при различных токах источника питания ( $I_1 < I_2 < I_3$ )

Поведение амплитуды колебаний напряжения  $\Delta U$  (рис. 4, б) и коэффициента модуляции  $M$  (рис. 4, в) при  $U_{г} = 0$  (кривые 1) аналогично поведению частоты при изменении протекающего в транзисторе тока (рис. 4, а) — вначале их значения возрастают, достигают наибольших значений при возникновении квазигармонических колебаний, а затем снова уменьшаются.

Подача смещения между истоком и подложкой не вызывает изменения качественной картины, но максимумы зависимостей  $f(I)$ ,  $\Delta U(I)$ ,  $M(I)$  смещаются в сторону меньших токов при приложении отрицательного смещения (рис. 4, кривые 2) и в сторону больших токов — при приложении положительного (рис. 4, кривые 3).

**Обсуждение результатов**

Для объяснения полученных результатов нами была предложена модель, в которой возникновение колебаний связано с периодическим возникновением и исчезновением шнура тока. Шнур тока образуется в обедненной носителями заряда области, которая возникает у стока транзистора за счет эффекта поля [4, т. 1, с. 338]. При увеличении тока, который протекает через структуру, обедненная область постепенно расширяется. Такую область можно представить в виде конденсатора, который заряжается током генератора. При зарядке напряжение на конденсаторе возрастает. Появляются условия [5, с. 262—267] для возникновения шнура тока.

Образование шнура тока приводит к шунтированию обедненной области и разрядке конденсатора. При этом напряжение на структуре падает до величины, которая определяется протекающим током  $I$  и сопротивлением балластной (не обедненной) части структуры.

Эквивалентная схема структуры, которая объясняет предложенный механизм образования колебаний, приведена на рис. 6. Соответствие эквивалентной схемы и КНИ-транзистора следующее:  $C$  — емкость обедненной области близ стока транзистора;  $R_0$  — сопротивление этой же области (внутреннее сопротивление емкости);  $R_{ш}$  — сопротивление шнура тока;  $P$  — разрядник;  $R_6$  — сопротивление балластной части структуры, т. е. сопротивление структуры за пределами высокоомной области.

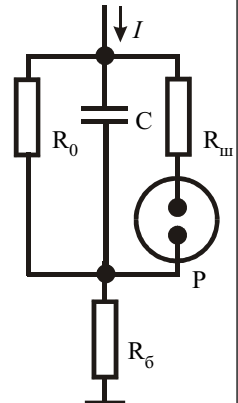


Рис. 6. Эквивалентная схема КНИ-транзистора

Разряд емкости  $C$  приводит к исчезновению шнура тока, поскольку напряжение на структуре резко уменьшается до  $U_{\min}$  и становится недостаточным для поддержания условий существования шнура (рис. 3). Исчезновение шунтирующего канала вновь приводит к появлению обедненной области с емкостью  $C$ . Емкость опять начинает заряжаться проходящим током, напряжение на структуре снова возрастает до величины  $U_{\max}$  (рис. 3), которая достаточна для возникновения шнура тока, и цикл колебаний напряжения повторяется.

Дальнейшее увеличение тока приводит к уменьшению времени  $t_2$  заряда емкости  $C$  (см. рис. 3). Время заряда  $t_2$  определяется величиной  $C$  и суммой сопротивления балластной части  $R_6$  (рис. 6) и внутреннего сопротивления генератора тока  $R_i$  (на рис. 6 не приведено). Время разряда  $t_1$  определяется величиной  $C$  и сопротивлением самого шнура тока  $R_{ш}$ . Поскольку величина емкости  $C$  и сопротивления шнура тока  $R_{ш}$  изменяются незначительно, то время разряда  $t_1$  сначала также почти не изменяется. Так как  $R_i + R_6 \gg R_{ш}$ , то время заряда значительно больше времени разряда. При  $I_1 < I_2$  такое условие выполняется, и форма колебаний имеет релаксационный характер.

С увеличением протекающего тока  $I$  постепенно уменьшается время заряда, а время разряда увеличи-

вается, и при некотором  $I$  возникает ситуация, когда  $t_1 \approx t_2$ . При этом колебания имеют вид, близкий к периодическим синусоидальным колебаниям.

Дальнейшее увеличение тока приводит к существенному разогреву канала шнура тока. Каждый следующий цикл колебаний “помнит” предшествующий цикл. Канал не успевает остыть за период разрядки емкости, и время  $t_1$  существования шнура увеличивается. Шнур существует до момента остывания канала за счет отвода тепла в подложку [2].

Чем больше ток, тем дольше существует шнур. Частота колебаний уменьшается, поскольку время заряда  $t_2$  уменьшается, а время разряда  $t_1$  увеличивается за счет увеличения протекающего тока.

При токе, превышающем  $I_3$ , колебания исчезают. Шнур тока не исчезает, а существует стационарно за счет протекающего тока. Перегрев транзистора в месте локализации шнура приводит к необратимым изменениям КНИ-транзистора.

По данным рис. 5 была оценена нестабильность частоты  $\Delta f/f$  генерируемых колебаний для разных токов, протекающих через транзистор. Для тока  $I_1$  она не превышала  $8 \cdot 10^{-3}$ , для  $I_2$  —  $1 \cdot 10^{-2}$ , для  $I_3$  —  $4 \cdot 10^{-2}$ . Безусловно, эти значения значительно уступают параметрам кварцевых генераторов ( $10^{-6}$  [6, с. 157]), однако достаточно близки к параметрам стабилизированных параметрических генераторов ( $10^{-4} \dots 10^{-3}$  [6, с. 156]).

Совместимость технологии КНИ с существующими технологиями изготовления полупроводниковых приборов [1, с. 6—9] делает возможным создание функционального генератора на основе КНИ-транзистора.

#### Заключение

1. Экспериментально показано, что в электрической цепи, содержащей КНИ-транзистор, можно без

внешнего периодического воздействия получить незатухающие колебания напряжения и тока и изменять их частоту и амплитуду (в широких пределах), а также характер колебаний (от релаксационных до квазигармонических) изменением протекающего тока или потенциала подложки.

2. Предложен физический механизм, объясняющий возникновение колебаний напряжения на КНИ-структуре периодическим возникновением шнура тока в обедненной области вблизи стока транзистора.

3. Полученные результаты позволяют говорить о возможности использования КНИ-транзистора в качестве генератора колебаний напряжения в широких пределах (0,1—1 МГц). При этом то, что он находится в гибридном режиме питания, не является существенным.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Cristoloveanu S., Li S. S. Electrical characterisation of silicon-on-insulator materials and devices.— Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995.

2. Dobrovolsky V. N., Ishchuk L. V., Ninidze G. K. et al. High-amplitude high-frequency oscillations of temperature, electron-hole pair concentration and current in the silicon-on-insulator structures // Journal of Applied Physics.— 2000.— Vol. 88, N 11.— P. 6554—6559.

3. Добровольський В. М., Ішук Л. В., Нінідзе Г. К., Павлюк С. П. Випромінювання світла термічно генерованою електронно-дірковою плазмою в польовому КНІ-транзисторі // Укр. фіз. журн.— 2002.— Т. 47, № 5.— С. 495—499.

4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 томах.— М.: Мир, 1984.

5. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках.— М.: Наука, 1972.

6. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике.— М.: Мир, 1990.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

#### **Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы.— М.: Радио и связь, 2004.— 320 с.**

Описываются основные радиационные эффекты в полупроводниковых приборах и интегральных схемах при воздействии радиационных факторов космического пространства. Кратко приведены сведения по физике взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и методам оценки уровней радиационных воздействий на изделия электронной техники, располагающиеся внутри космического аппарата. Рассмотрены основные доминирующие радиационные эффекты (структурные повреждения, поверхностные и локальные) в элементах интегральных схем. Впервые в отечественной литературе с единых позиций проанализированы отказы и сбои, вызываемые отдельными ядерными частицами, и обобщены методы защиты от них.

Для специалистов, разрабатывающих интегральные схемы и электронную аппаратуру космических аппаратов; может быть полезна аспирантам и студентам вузов.

#### **Кузнецова С. А., Несперенко А. В., Афанасьев А. О. OrCAD 10. Проектирование печатных плат.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 454 с.**

Рассмотрены вопросы схемотехнического проектирования радиоэлектронной аппаратуры и проектирования печатных плат с использованием пакета программ OrCAD 10. Приведены подробные описания основных модулей программы Capture и Layout. Освещены вопросы работы с этими подсистемами: описание среды проекта, работа в графических редакторах, получение сопутствующих отчетов, создание и ведение библиотек условно-графических образов и посадочных мест. Отдельная глава посвящена особенностям работы с внешними и встроенными базами данных в подсистеме Capture CIS.

Книга написана на основе технической документации и опыта работы авторов с данной системой и составлена таким образом, что может служить руководством пользователю при работе с различными версиями программы от OrCAD 7 до OrCAD 10.

Для инженерно-технических работников; может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в области разработки и конструирования электронной аппаратуры.

