

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.

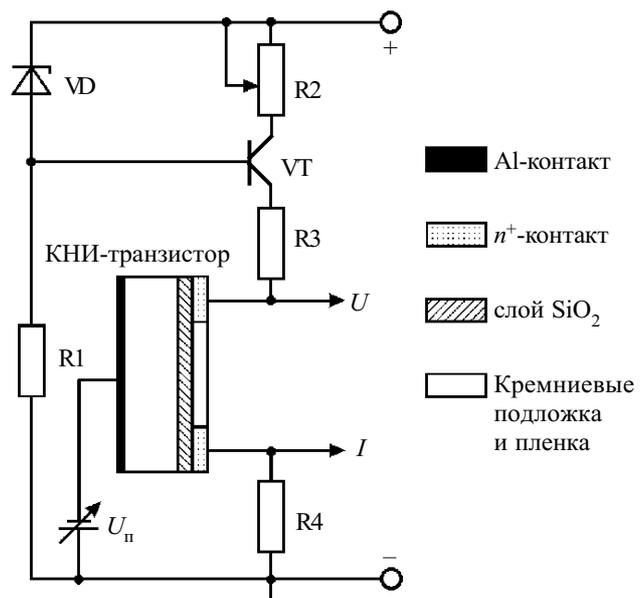


Рис. 1. КНИ-транзистор и схема его включения в измерительную цепь

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 ($U_{\text{п}}=0$).

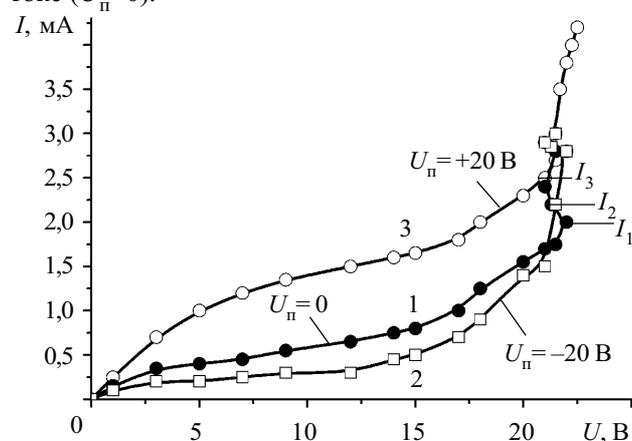


Рис. 2. ВАХ КНИ-транзистора при различном смещении на подложке относительно истока транзистора

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-

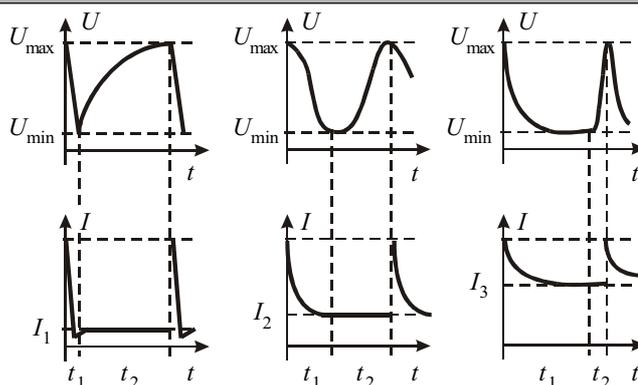


Рис. 3. Осциллограммы колебаний напряжения и тока в КНИ-транзисторе при различных токах источника питания $I_1 < I_2 < I_3$

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_{max} до U_{min} , после чего за время t_2 почти по экспоненте растет до исходного значения U_{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 (≈ 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.

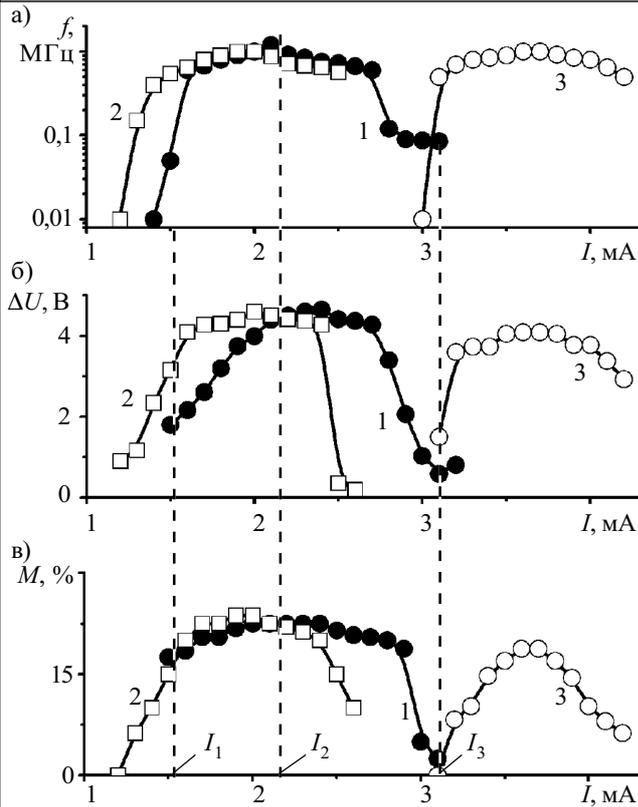


Рис. 4. Зависимости частоты f (а), амплитуды колебаний напряжения ΔU (б) и коэффициента модуляции M (в) от тока, протекающего через КНИ-транзистор, при различном смещении на подложке относительно истока транзистора U_g :
1 — 0 В; 2 — -20 В; 3 — +20 В

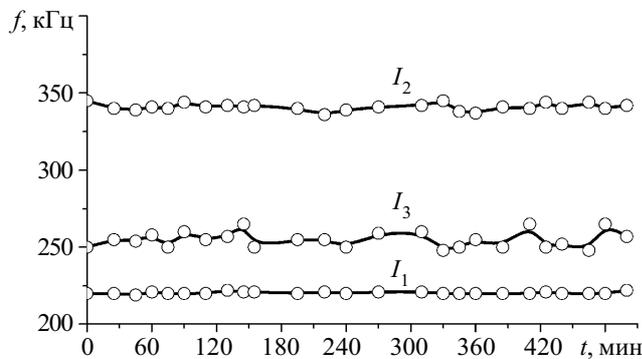


Рис. 5. Стабильность частоты генератора во времени при различных токах источника питания ($I_1 < I_2 < I_3$)

Поведение амплитуды колебаний напряжения ΔU (рис. 4, б) и коэффициента модуляции M (рис. 4, в) при $U_g = 0$ (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.

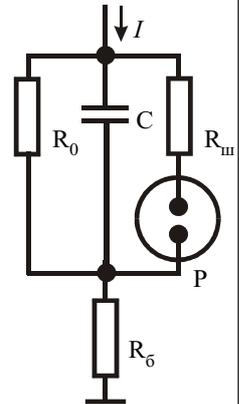


Рис. 6. Эквивалентная схема КНИ-транзистора

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 $I_1 < I < I_2$ 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. Добровольский В. М., Ишук Л. В., Нинидзе 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

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.

