

Использование системы TCAD для разработки маршрута изготовления комплементарных биполярных транзисторов в составе ОУ

А.В. Соловьев^{1,2}, Т.Ю. Крупкина¹, А.М. Лагун²

¹*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г.Москва, Россия*

²*АО «Ангстрем», г.Москва, Россия*

sablok@mail.ru

Быстродействующие широкополосные аналоговые интегральные схемы на основе комплементарной биполярной технологии находят широкое применение в современной аппаратуре. Быстродействие таких схем напрямую связано с граничной частотой используемых транзисторов.

Рассмотрены современные подходы к разработке комплементарных биполярных технологий, обеспечивающих высокое быстродействие проектируемых интегральных схем и систем на кристалле. Средствами САПР TCAD проведено приборно-технологическое моделирование элементной базы. Разработан технологический маршрут изготовления операционного усилителя по быстродействующей комплементарной биполярной технологии с самосовмещенным эмиттерно-базовым узлом на основе двух слоев поликремния. Для обеспечения самосовмещения базового и эмиттерного слоев поликремния при изготовлении $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов сформирован L -образный нитридный спейсер. Боковая изоляция компонентов выполнена узкими вертикальными щелями, облицованными окислом и нитридом кремния и заполненными поликремнием.

Разработанный технологический маршрут изготовления $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов на одном кристалле позволил достигнуть граничной частоты 8–10 ГГц при пробивных напряжениях коллектор – эмиттер больше 10 В. В значительной степени решена проблема комплементарности биполярных транзисторов. В дальнейшем это даст возможность создать новый класс отечественных широкополосных и быстродействующих аналого-цифровых интегральных схем и обеспечить технологическую независимость РФ.

Ключевые слова: комплементарная биполярная технология; операционные усилители (ОУ); приборно-технологическое моделирование; TCAD.

Для цитирования: Соловьев А.В., Крупкина Т. Ю., Лагун А.М. Использование системы TCAD для разработки маршрута изготовления комплементарных биполярных транзисторов в составе ОУ // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 440–446. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-440-446

Using TCAD System for Development of Manufacture Route of Complimentary Bipolar Transistors as a Part of OD Devices

A.V. Solov'ev^{1,2}, T.U. Krupkina¹, A.M. Lagun²

¹National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia

²JSC «Angstrom», Moscow, Russia

sablok@mail.ru

The high-speed broadband analog integrated circuits based on the complimentary bipolar technology are widely used in modern equipment. The speed of such circuits is directly related to the boundary frequency of the transistors used. Some modern approaches to development of the complimentary bipolar technologies, providing the high performance of the designed integrated circuits and systems on a chip, have been considered.

With the help of CAD software TCAD the device-technological modeling of the element basis has been carried out. The technological route for manufacturing an operational amplifier by the high-speed complimentary technology with a self-compliant emitter-base note, based on two layers of polysilicon, has been developed. To ensure the self-alignment of the base and emitter layers of polysilicon in manufacture of the NPN and PNP transistors with formation of an L-shaped nitride spacer has been used. The side insulation of the components has been accomplished by narrow vertical slits lined with oxide and silicon nitride and filled with polysilicon.

The developed technological manufacturing route has permitted to reach the boundary frequency of the NPN and PNP transistors on a single crystal of 8-10 GHz with the breakdown voltages of the collector-emitter of more than 10 V. To a large extent the problem of the complementarity of bipolar transistors has been solved. In future this will give the possibility to create a new class of domestic broadband and high-speed analog-digital integrated circuits and to provide the technological independence of the Russian Federation.

Keywords: complementary bipolar technology; operational amplifiers (OpAmp); device-technological modeling; TCAD.

For citation: Solov'ev A.V., Krupkina T.U., Lagun A.M. Using TCAD System for Development of Manufacture Route of Complimentary Bipolar Transistors as a Part of OD Devices // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. 440–446. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-440-446

Введение. Быстродействующие широкополосные аналоговые интегральные схемы на основе комплементарной биполярной технологии широко применяются в операционных, логарифмических, буферных усилителях, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователях [1, 2]. Быстродействие таких схем напрямую связано с граничной частотой используемых транзисторов. Сложность представляет создание $p-n-p$ -транзисторов, сопоставимых по значению граничной частоты с $n-p-n$ -транзисторами.

В АО «Микрон» (г. Москва, г. Зеленоград) серийно освоены КМОП-процессы с проектной формой 130 нм, АО «Ангстрем-Т» (г. Москва, г. Зеленоград) готовит к запуску производство с проектной нормой 90 нм [3]. Однако эти КМОП-процессы не мо-

гут обеспечить разработку и импортозамещение некоторых классов быстродействующих операционных усилителей (ОУ). Серийная быстродействующая самосовмещенная комплементарная биполярная технология в нашей стране отсутствует.

Зарубежные фирмы-производители аналоговых интегральных схем достигли граничных частот комплементарных транзисторов, превышающих 5 ГГц [4]. Например, процесс VIP-10 фирмы National Semiconductor, в котором используется технология кремний на изоляторе, обеспечивает граничную частоту транзистора 8 ГГц при напряжении питания 12 В. Процесс HJV компании Zarlink Semiconductor Inc., где применяется комбинированная изоляция, позволяет создавать транзисторы с граничной частотой передачи тока 9 ГГц и напряжением коллектор – эмиттер 14 В [5]. Разработанные за последние десятилетия различные комплементарные биполярные технологии, обеспечивают высокие частотные характеристики транзисторов. Исследования направлены прежде всего на уменьшение вертикальных размеров транзисторов для достижения требуемых значений граничной частоты усиления. Процессы ионного легирования позволяют реализовать мелкие переходы базы и эмиттера. Однако уменьшение глубины эмиттера не обеспечивает высокий коэффициент усиления транзисторов с алюминиевым контактом к нему из-за очень высокой скорости поверхностной рекомбинации на границе эмиттера и металлического контакта.

Разработка технологии формирования эмиттера из поликремния дает возможность примерно в 5 раз повысить коэффициент усиления транзисторов по сравнению с обычным мелкозалегающим эмиттером. Дальнейшее повышение быстродействия транзисторов ограничивается возможностями фотолитографических процессов – точностью совмещения и минимальными воспроизводимыми размерами [6]. С развитием процессов реактивного ионного травления разработана концепция самосовмещенных базовых и эмиттерных поликремниевых контактов, благодаря которой латеральные размеры транзисторов значительно уменьшаются. Этот подход стал основным при разработке быстродействующей элементной базы, поскольку минимизирует основные паразитные характеристики биполярных транзисторов, такие как сопротивление базы, время переноса носителей через базу, емкости коллектора и эмиттера [7]. Поликремниевые контакты к эмиттеру и базе позволяют масштабировать размеры, т.е. согласованно уменьшать латеральные и вертикальные размеры приборов. Улучшенное быстродействие в масштабированных приборах зависит в значительной степени от плотности протекающего тока. Поэтому необходимо повысить концентрацию легирующей примеси в области коллектора, чтобы увеличить критическую плотность тока для устранения эффекта Кирка [8, 9].

Результаты технологического моделирования. В соответствии с выбранными конструктивно-технологическими решениями разработан технологический маршрут изготовления ОУ по быстродействующей комплементарной биполярной технологии с самосовмещенным эмиттерно-базовым узлом на основе двух слоев поликремния. Физико-топологическая структура элементов приборной базы разработана с помощью приборно-технологического моделирования TCAD [10, 11]. Схематическое изображение поперечного сечения структуры $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов представлено на рис.1.

Разработанный быстродействующий комплементарный биполярный процесс выполнен по самосовмещенной технологии эмиттерно-базового узла на основе двух слоев поликремния и обеспечивает формирование приборной базы со следующими техническими требованиями:

- $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы имеют вертикальную структуру;
- используются поликремниевые резисторы;

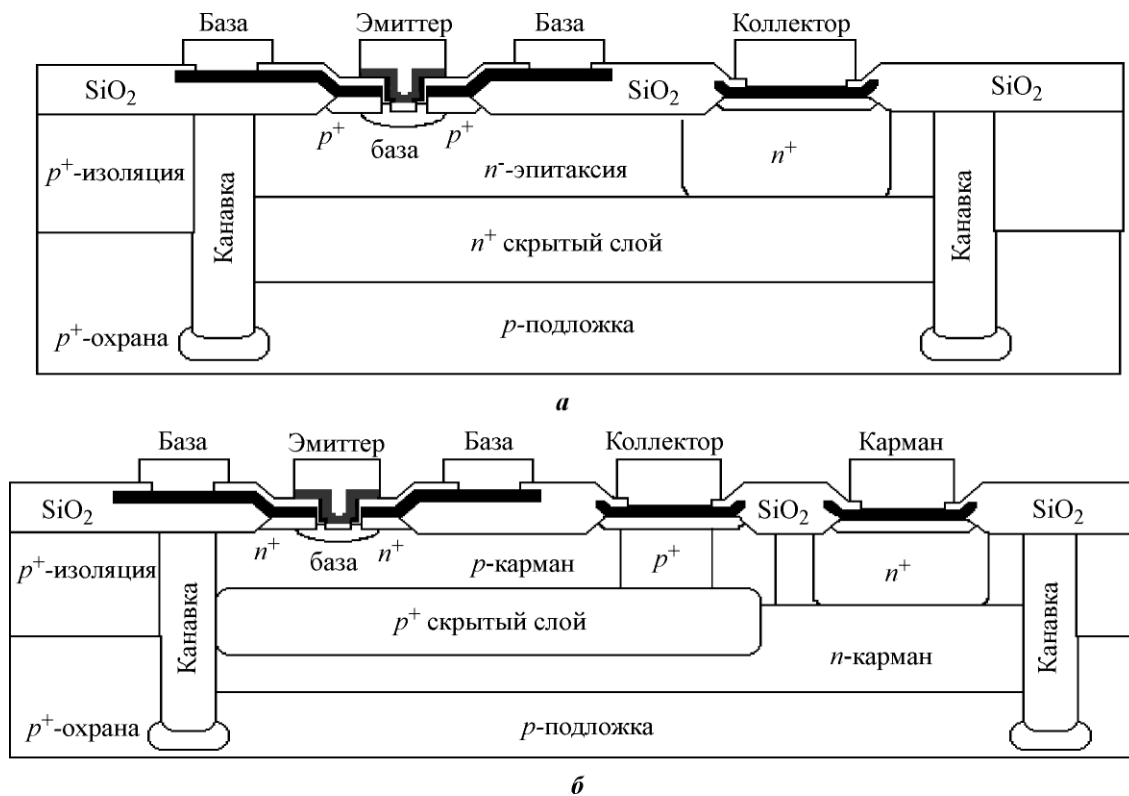


Рис.1. Схематическое изображение поперечного сечения структуры $n-p-n$ -транзистора (а) и $p-n-p$ -транзистора (б)

Fig.1. The layout view of a lateral section of structure NPN (a) and PNP (b) transistors

- конденсаторы имеют структуру металл – нитрид кремния – металл;
- $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы изготовлены по планарно-эпитаксиальной комплементарной биполярной технологии на кремниевой подложке с формированием трех скрытых слоев;
- толщина эпитаксиального слоя при моделировании составляет 2,5 мкм (в дальнейшем может быть оптимизирована до ~ 2 мкм);
- контактные области к базе и коллектору $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов выполнены в слое базового поликремния;
- $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы имеют поликремниевые эмиттеры, выполненные во втором слое поликремния и самосовмещенные с базовыми поликремниевыми контактами;
- для уменьшения эффекта узкого эмиттера, при котором эмиттерный поликремний на краю окна утолщается, толстый окисный спейсер заменен тонким L -образным нитридным спейсером;
- $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы имеют глубокие коллекторы;
- технологический процесс включает формирование два слоя поликремния и два слоя металлизации;
- процесс выполняется по 0,8-мкм проектной норме (ширина изолирующей канавки), минимальный размер поликремниевого эмиттера 0,6 мкм получается из размера эмиттерной апертуры 1,0 мкм после формирования L -образного нитридного спейсера, размеры в остальных слоях не менее 1,0 мкм;

- разгонка и активация слоев проводятся на финишных операциях быстрым термическим отжигом (rapid thermal annealing, RTA).

Использование изоляции на основе узких ($\sim 0,8$ мкм) вертикальных щелей, облицованных слоями окисла и нитрида и заполненных поликремнием, позволяет в несколько раз снизить емкость коллектор – подложка. Для эффективного уменьшения рельефа при формировании щелевой изоляции используется комбинированная планаризация с применением методов химико-механической полировки (chemical-mechanical planarization, CMP) и сухого процесса реактивного ионного травления.

Основные параметры $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов с размером эмиттера $0,8 \times 4,0$ мкм представлены в таблице.

Основные параметры $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов
Critical parametres NPN and PNP transistors

Параметр	$n-p-n$ -транзистор	$p-n-p$ -транзистор
Граничная частота передачи тока f_T , ГГц ($I_C = 0,2$ мА, $U_{CE} = 2$ В)	10	8
Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером h_{21E} ($I_C = 10$ мкА, $U_{CB} = 0$)	80	35
Напряжение Эрли U_{AF} , В	70	30
Пробивное напряжение коллектор – база U_{CBO} , В ($I_C = 1$ мкА)	26	20
Пробивное напряжение коллектор – эмиттер U_{CEO} , В ($I_C = 1$ мкА)	16	12
Пробивное напряжение эмиттер – база U_{EBO} , В ($I_E = 1$ мкА)	3	3
Сопротивление базы R_B , Ом	2800	3000
Сопротивление коллектора R_C , Ом	900	2000
Емкость эмиттерного перехода C_{JE} , фФ ($U_{BE} = 0$)	7,2	5,0
Емкость коллекторного перехода C_{JC} , фФ ($U_{BC} = 0$)	3,5	3,5
Емкость перехода коллектор – подложка C_{JS} , фФ ($U_{CS} = 0$)	6,1	16
Емкость перехода изолирующий карман – подложка C_{IS} , фФ/мкм ($U_{CS} = 0$)	–	8
Размер эмиттера, мкм	0,6 × 4,0	
Глубина эмиттера, мкм	0,04	0,08
Глубина коллектора, мкм	4,2	4,3
Ширина базы, мкм	0,15	0,16
Поверхностное сопротивление эмиттера в кремнии, Ом/□	350	1200
Поверхностное сопротивление базы в кремнии, Ом/□	3800	4800

Кривые Гуммеля ($I_C(U_{EB})$ и $I_B(U_{EB})$) и зависимость коэффициента усиления от напряжения эмиттер – база $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов представлены на рис.2.

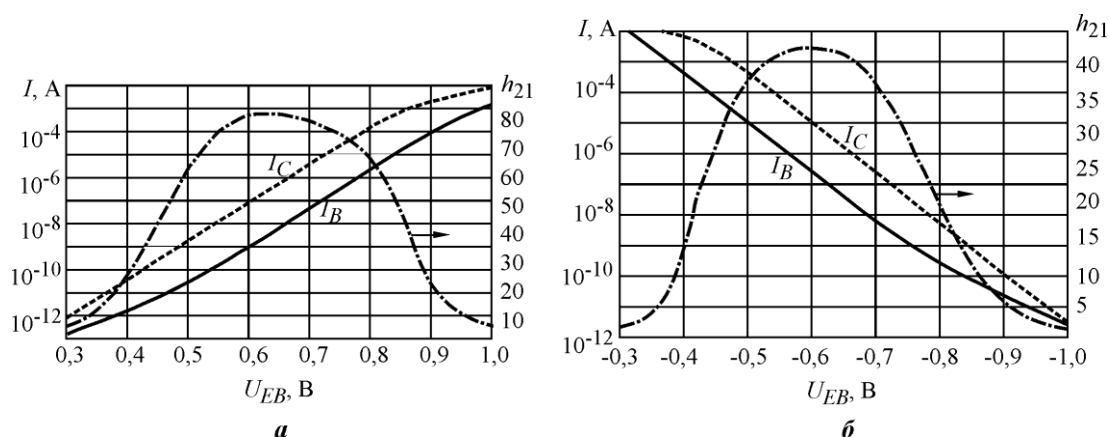


Рис.2. Кривые Гуммеля и зависимость коэффициента усиления от напряжения эмиттер – база $n-p-n$ -транзистора (а) и $p-n-p$ -транзистора (б)

Fig.2. Gummel curves and dependence of an amplification factor on emitter-base voltage NPN transistor (a) and PNP transistor (b)

Закключение. Представленные технологические решения позволили достигнуть граничной частоты $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов на одном кристалле 8–10 ГГц при пробивных напряжениях коллектор – эмиттер больше 10 В. Статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером составляет 80 и 35 соответственно для $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов.

Литература

1. Мамий А.Р., Тлячев В.Б. Операционные усилители. – Майкоп: АГУ, 2005. – 192 с.
2. Monticelli D.M. The future of complementary bipolar // Proc. of the IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology. – 2004. – P. 21–25.
3. Хохлов М.В., Демин А.А., Морозов В.Ф. Разработка комплементарной биполярной технологии для реализации аналоговых ИМС высокого быстродействия // «Пульсар-2008». Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА: материалы VII науч.-техн. конф. – М., 2008. – С. 62–63.
4. Lukasevich M.I. Method for producing complementary vertical bipolar transistors for integrated circuits // Patent PCT/RU2007/000466. 2008.
5. A 12Volt, 12GHz complementary bipolar technology for high frequency analogue applications / M.C. Wilson, S. Nigrin, S.J. Harrington et al. // Proc. of the IEEE 32th European Solid-State Device Research Conference. – 2002. – P. 375–378.
6. Лойко К.В. Модель подвижности неосновных носителей заряда в поликремниевых эмиттерах // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 90. – С. 36–44.
7. Reisch M. High-frequency bipolar transistors. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
8. Luigia Lanni Lateral p-n-p transistors and complementary SiC Bipolar Technology // IEEE Electron Device Letters. – 2014. – 19 February. – P. 428–430.
9. A complementary bipolar technology family with a vertically integrated PNP for high-frequency analog applications / R. Bashir, F. Hebert, J. DeSantis et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2002. – 07 August. – P. 2525–2534.
10. Synopsys – Official Site. – URL: <https://synopsys.com/> (дата обращения: 18.04.2017).
11. Храпов М.О. TCAD – simulation of the complementary bipolar pair of transistors // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (29 June – 3 July, 2015). – 2015.

Поступила 19.04.2017 г.; принята к публикации 13.06.2017 г.

Соловьев Андрей Владимирович – инженер АО «Ангстрем» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2, стр. 3), аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sablok@mail.ru

Крупкина Татьяна Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), krupkina@miee.ru

Лагун Александр Михайлович – руководитель группы АО «Ангстрем» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 2, стр. 3), lagun@angstrem.ru

References

1. Mamij A.R., Tlyachev V.B. *Operacionnnye usiliteli* [Operational amplifier]. Majkop, AGU, 2005. 192 p. (in Russian).
2. Monticelli D.M. The future of complementary bipolar. *Proc. of the IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology*, 2004, pp. 21–25
3. Hohlov M.V., Demin A.A., Morozov V.F. Razrabotka komplementarnoj bipolyarnoj tekhnologii dlya realizacii analogovyh IMS vysokogo bystrodejstviya [Development of a complementary bipolar technology for implementation analogue IMS a fast response time] *Materialy VII nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Tverdotel'naya elektronika, slozhnye funkcional'nye bloki REA»* [Proc. of the VII scientific and technical conference «Solid-state electronics, the complicated function units of the radio-electronic equipment»]. Moscow, 2008, pp. 62–63. (in Russian).
4. Lukasevich M.I. *Method for producing complementary vertical bipolar transistor for integrated circuits*. Patent PCT/RU2007/000466. 2008
5. Wilson M.C., Nigrin S., Harrington S. J., Manson A. J., Thomas S., Benton L., Connor S., Osborne P. H. A 12V, 12GHz Complementary Bipolar Technology for High Frequency Analogue Applications. *Proc. of the IEEE 32th European Solid-State Device Research Conference*, 2002, pp. 375–378.
6. Lojko K.V. Model' podvizhnosti neosnovnyh nositelej zaryada v polikremnievyh emitterah [A model for minority carrier mobility in polysilicon emitters]. *Nauchnyj zhurnal KubGAU –Scientific Journal of KubSAU*, 2013, no. 90, pp.36–44. (in Russian).
7. Reisch M. *High-Frequency Bipolar Transistors*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
8. Luigia Lanni Lateral p-n-p Transistors and Complementary SiC Bipolar Technology. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, 19 February, pp. 428–430.
9. Bashir R., Hebert F., DeSantis J., McGregor J.M., Yindeepol W., Brown K., Moraveji F., Mills T. B., Sadovnikov A., McGinty J., Hopper P., Sabsowitz R., Khidr M., Krakowski T., Smith L., Razouk R. A complementary bipolar technology family with a Vertically Integrated PNP for high-frequency analog applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2002, 07 August, pp. 2525–2534.
10. Synopsys – Official Site. Available at: <https://synopsys.com/> (accessed: 18.04.17).
11. Hrapov M.O. TCAD — Simulation of the complementary bipolar pair of transistors. *Proc. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, 2015.

Submitted 19.04.2017; accepted 13.06.2017.

Solov'ev Andrej V. – engineer of the JSC «Angstrem» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 2, str. 3), PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sablok@mail.ru

Krupkina Tatyana Y. – Doctor of technical science, professor of the Integrate Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), krupkina@miee.ru

Lagun Alexander M. – team leader of the JSC «Angstrem» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 2, str. 3), lagun@angstrem.ru