

Проектирование сложнофункциональных блоков смешанного сигнала на основе субмикронной технологии на примере микросхемы видеodeкодера. Часть 2. Верификация микросхемы «на кремнии»

П.С. Хабаров, Д.Л. Шлемин, В.Д. Лысь, Ю.П. Лебедев,
В.Ю. Васильев, Ю.Н. Попов¹

Спроектирован и изготовлен в виде отдельной кремниевой твердотельной интегральной микросхемы сложнофункциональный блок мультистандартного PAL/NTSC видеodeкодера класса «микросхема смешанного сигнала», включающий блок цифрового модулятора и трехканальный 10-разрядный цифро-аналоговый преобразователь с рабочей частотой 27 МГц. Микросхема разработана на основе КМОП технологии с проектно-технологическими нормами 0.18 мкм, включающей опции аналогового проектирования с использованием конденсаторной структуры типа «металл – изолятор – металл». Во второй части работы представлены результаты верификации конструкции и топологии микросхемы «на кремнии», обсуждаются результаты обследования параметров и особенностей микросхемы, предназначенной для цифрового телевидения и мультимедийных приложений.

Ключевые слова: сложнофункциональный блок, PAL/NTSC, видеodeкодер, цифро-аналоговый преобразователь, модулятор.

1. Введение

В первой части настоящей работы [1] на примере сложнофункционального блока (СФ-блока) трёхканального видеodeкодера рассматривались вопросы проектирования интегральных микросхем смешанного сигнала, содержащих цифровые и аналоговые блоки, с использованием базовой КМОП-технологии с проектно-технологическими нормами 0.18 мкм. Во второй части работы изложены и обсуждаются результаты анализа характеристик и параметров экспериментальных образцов СФ-блока, изготовленных в виде микросхем в стандартных корпусах типа QFP.

2. Методика эксперимента и измерений

2.1. Изготовление экспериментальных образцов

Чипы СФ-блока видео ЦАП были изготовлены на зарубежной кремниевой фабрике. Использовалась базовая КМОП-технология 0.18 мкм, опционно предполагающая возможность изготовления МИМ («металл – изолятор – металл») конденсаторных структур, необходимых для реализации аналоговых блоков микросхемы. После изготовления часть чипов для про-

¹ Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

ведения измерений параметров была собрана в 64-х выводные пластмассовые корпуса типа QFP.

2.2. Методика проведения измерений

Для измерения полученных образцов была использована плата цифро-аналогового ввода-вывода PCI-6251 (National Instruments, США). Данная плата представляет собой 16-канальную систему сбора данных с частотой дискретизации аналогового сигнала до 1.25 миллиона выборок в секунду, с разрешением в 16 разрядов. Чувствительность платы от 6 мкВ, точность от 52 мкВ. Подключение образцов микросхемы проводилось по схеме, представленной на рис. 1.

На цифровых выходах платы PCI-6251 формировался цифровой код для образцов видео ЦАП; выходной сигнал измеряемых ЦАП оцифровывался аналоговыми входами. Для измерения нелинейности была проведена серия из 1024 измерений, что полностью охватывает диапазон испытываемого 10-разрядного ЦАП. Измерения шумов и спектра выходного сигнала производились аналогичным способом, за исключением того, что на вход подавался монотонный синусоидальный сигнал. В дальнейшем полученные данные были обработаны для получения графиков интегральной и дифференциальной нелинейностей, значений сигнал/шум и т.д.



Рис.1. Блок-схема проведения измерений параметров чипа видеodeкодера

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Анализ технологической реализации конструкции чипов видео ЦАП

На рис. 2 «в плане» показано изображение внешнего вида чипа, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки JSM-6510A (Jeol, Япония). Помимо собственно СФ-блока, топология которого была представлена на рис.8 в первой части работы [1], на рис.2 видны также шины земли-питания элементов ввода-вывода и элементы ввода-вывода, обозначенные цифрами I и II, соответственно.

Для демонстрации технологической реализации конструкции микросхемы и их особенностей обычно проводится анализ сечения интегральных микросхем с помощью СЭМ (т.н. «SEM cross-section analysis»). Такой анализ позволяет не только визуализировать особенности формы отдельных элементов конструкции, но и провести измерения реальных размеров элементов микросхемы. Неудобством такой методики применительно к чипам малого размера является сложность раскалывания чипа в нужном направлении и получение, как правило, недостаточно качественного скола. Последнее затрудняет проведение измерений из-за от-

сутствия необходимой чёткости изображений СЭМ, ввиду чего необходимо использовать специальные технологические приёмы обработки сколов образцов для улучшения контрастности изображения.

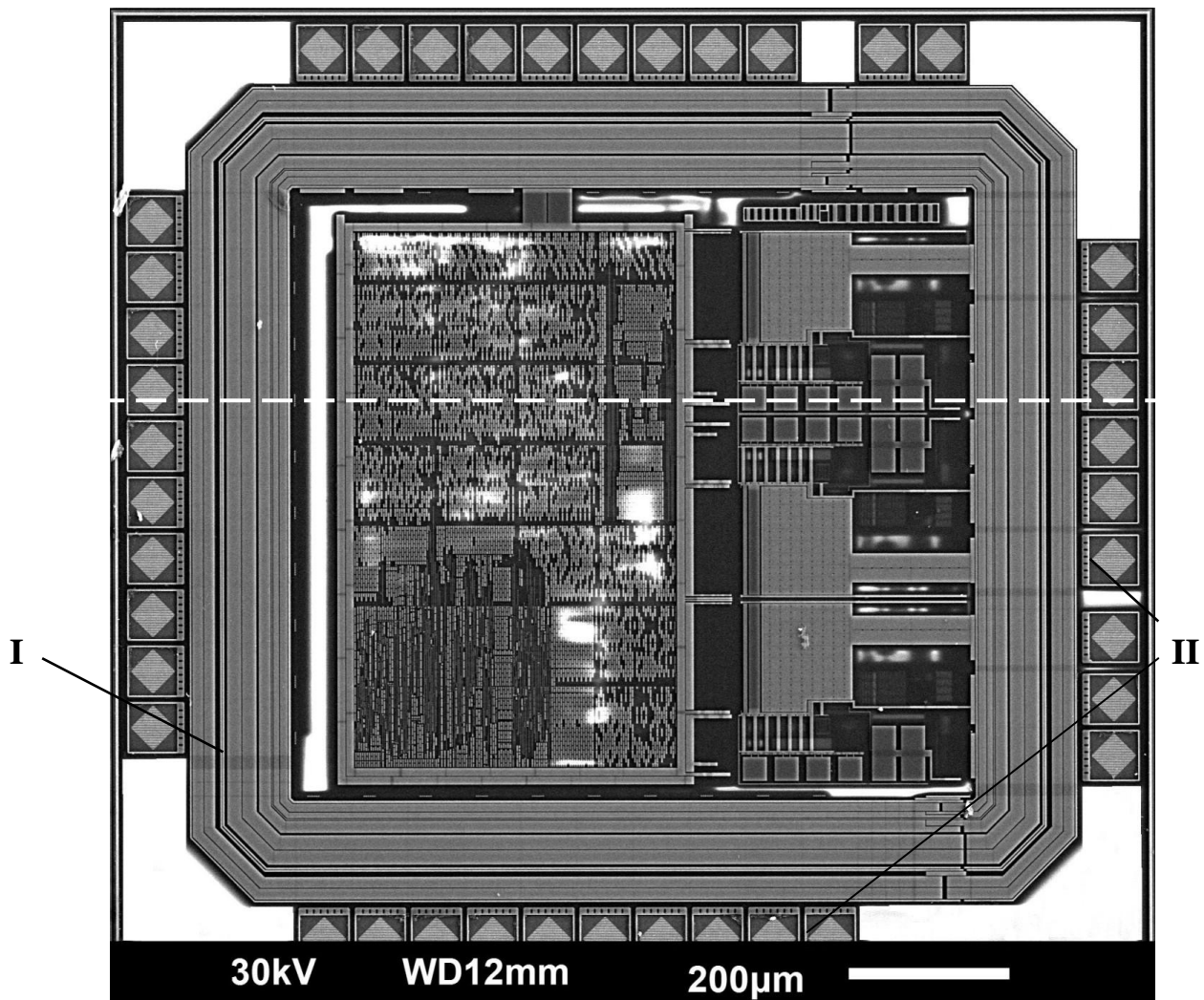


Рис. 2. Вид сверху на изготовленный чип микросхемы видео ЦАП. Пунктирной линией показано направление скола чипа для последующего анализа сечения с помощью СЭМ

Для анализа поперечного сечения после разламывания чипа в выбранном направлении (см. пунктирную линию на рис. 2), часть чипа крепилась сколом вверх на держатель для СЭМ с помощью электропроводящего скотча. Далее со скола удалялись осколки кремния и отслоившихся структур микросхемы путём его обдува сжатым воздухом. Какого-либо дополнительного «декорирования» путём специального травления скола не проводилось. Перед анализом на подготовленный скол чипа напыляли слой платины толщиной примерно 5 нм с использованием установки JFC-1600 (Jeol, Япония).

На рис. 3 показан внешний вид поперечного сечения чипа, расколотого в направлении, указанном пунктирными линиями на рис. 2 и зафиксированный в направлении «под углом» к поверхности чипа. Вверху на рис. 3 приведены обозначения укрупнённых внешних видов некоторых узлов микросхемы, показанных на рис. 4 (а,б,в,г), зафиксированных в направлениях «под углом» или перпендикулярно сколу чипа.

На изображениях рис. 4(а) чётко видны элементы 6-ти уровневой системы алюминиевой металлизации: алюминиевые слои и контакты между ними. Однако наибольший интерес

представляла технологическая реализация аналоговых элементов микросхемы. На рис. 4 (в) стрелками указаны изолирующее кольцо (I) и МИМ конденсаторная структура, расположенная между 5-м и 6-м уровнями металлической разводки микросхемы (II). Как видно из изображения на рис. 4(г), конденсатор включает в себя поверх 5-го слоя металла (III) дополнительный изолирующий слой (IV) и тонкий дополнительный слой металла (V), соединённый цилиндрическими контактами (VI) с 6-м слоем металла (VII).

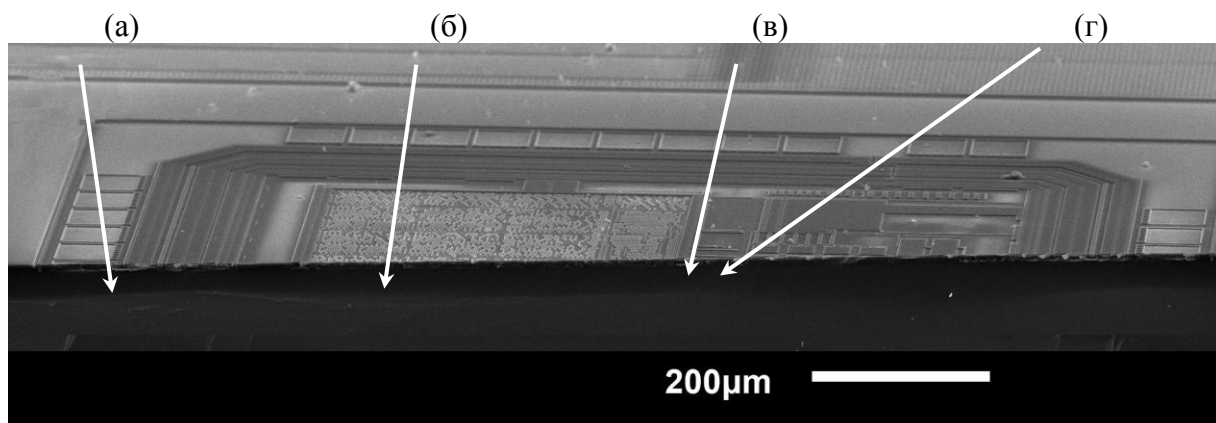


Рис.3. Вид сверху в направлении «под углом» на поперечное сечение чипа видео ЦАП и обозначения отдельных элементов микросхемы, представленных ниже более детально на рис. 4(а,б,в,г): шины земли-питания элементов ввода-вывода (а), область цифрового модулятора (б), элемент аналогового блока (в), край элемента МИМ конденсатора (г)

Проведённые измерения размеров характерных элементов микросхемы показали, что в пределах чёткости полученных изображений они близки к параметрам, установленным в проектно-технологической документации фабрики-изготовителя.

3.2. Анализ электрических характеристик чипов видеodeкодера

Собранные в корпуса экспериментальные образцы чипов видеodeкодера были функционально протестированы и измерены при температуре 25°C. Результаты функционального тестирования показаны в виде изображения с осциллографа генерируемого видеodeкодером видеосигнала (рис. 5) и фотографии изображения телевизионного приёмника, подсоединённого к работающей микросхеме (рис. 6).

Измерения аналоговых характеристик микросхемы проводились отдельно, что позволило оценить все параметры субмодулей независимо. Для измерений были произвольно взяты три образца, а каждый аналоговый видеоканал измерялся по несколько раз. Режимы и результаты проведённых измерений электрических характеристик чипа суммированы в табл. 1 и табл. 2, соответственно.

Типичные результаты измерений наиболее важных параметров видеodeкодера, таких как интегральная нелинейность и дифференциальная нелинейность, показаны на рис. 7 и рис. 8, соответственно. Типичный спектр плотности шума монотонного синусоидального сигнала частотой 13 кГц приведён на рис. 9. Измеренный ток потребления микросхемы составлял не более 27 мА при напряжении питания 3.3 В.

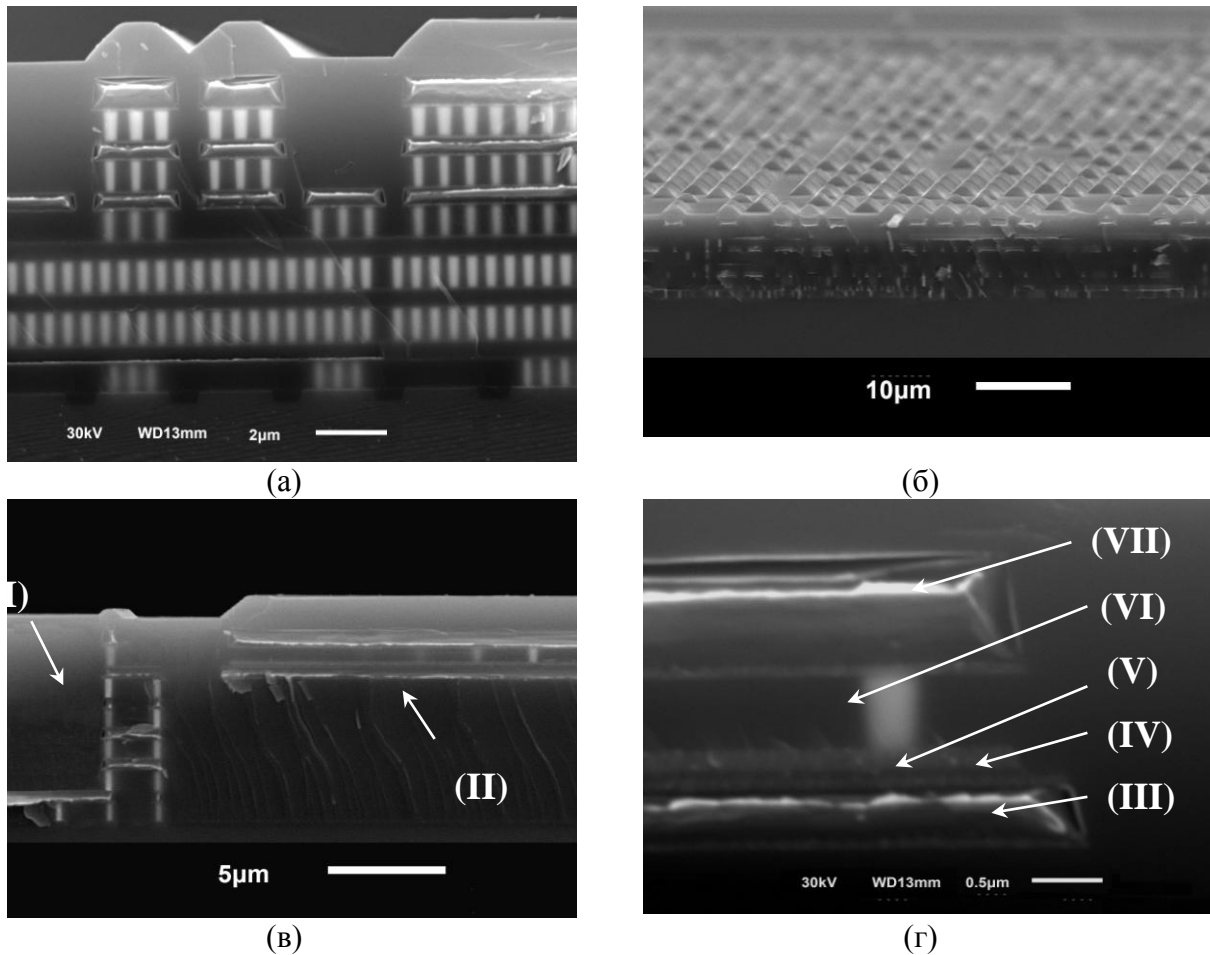


Рис.4. Укрупнённые изображения выделенных на рис. 3 отдельных элементов поперечного сечения микросхемы (обозначения сохранены): шины земли-питания элементов ввода-вывода (а), область цифрового модулятора (б), элемент аналогового блока (в), край элемента МИМ конденсатора (г) (см. пояснения в тексте)

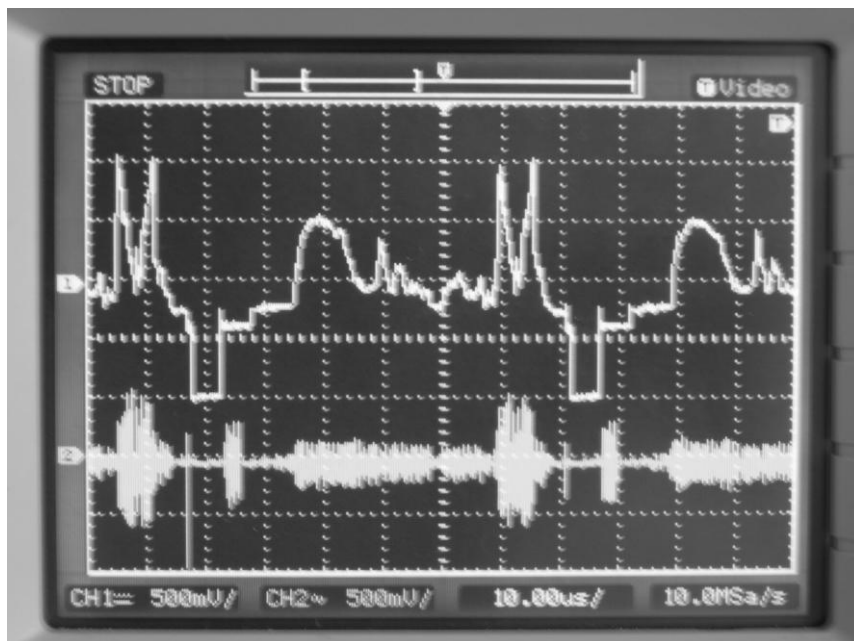


Рис.5. Пример аналогового видео на экране осциллографа



Рис.6. Пример изображения, полученного после преобразования сигнала через разработанную микросхему видеodeкодера на телевизионном приёмнике

Таблица 1. Режимы измерений изготовленного чипа видеodeкодера

Символ	Параметр	Единица измерения	Минимум	Типовое значение	Максимум
V_{DDA}	Аналоговое напряжение питания	В	3.1	3.3	3.5
V_{DDD}	Цифровое напряжение питания	В	1.7	1.8	1.9
R_L	Сопrotивление нагрузки	Ом	75	-	300
F_{CLOCK}	Тактовая частота	МГц	27		

Таблица 2. Электрические характеристики изготовленного чипа видеodeкодера

Символ	Параметр	Единица измерения	Минимум	Типовое значение	Максимум
$LE_{LF(I)}$	Интегральная нелинейность на низкой частоте	МЗР*	± 0.35	± 0.5	± 0.7
$LE_{LF(D)}$	Дифференциальная нелинейность на низкой частоте	МЗР*	± 0.2	± 0.25	± 0.35
THD	Полные гармонические искажения	%	0.03	0.05	0.08
THD+N	Полные гармонические искажения и шум	%	0.5	0.7	1
SINAD	Отношение «сигнал/шум и искажения»	дБ	60	62	63
SFDR	Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих	дБ	67	72	75
VO(P-P)	Амплитуда выходного сигнала без нагрузки	В	-	1.4	-

* Младший значащий разряд (least significant bit, LSB).

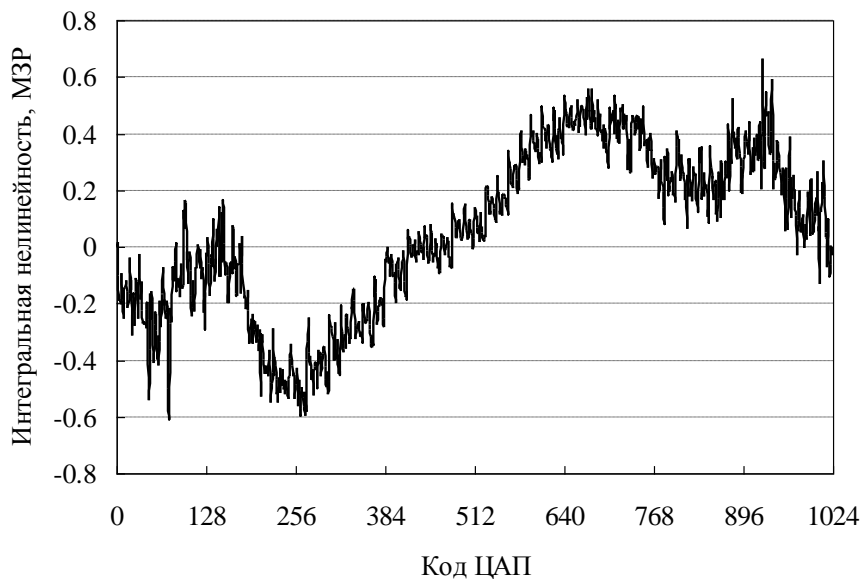


Рис. 7. Интегральная нелинейность одного канала видеodeкодера

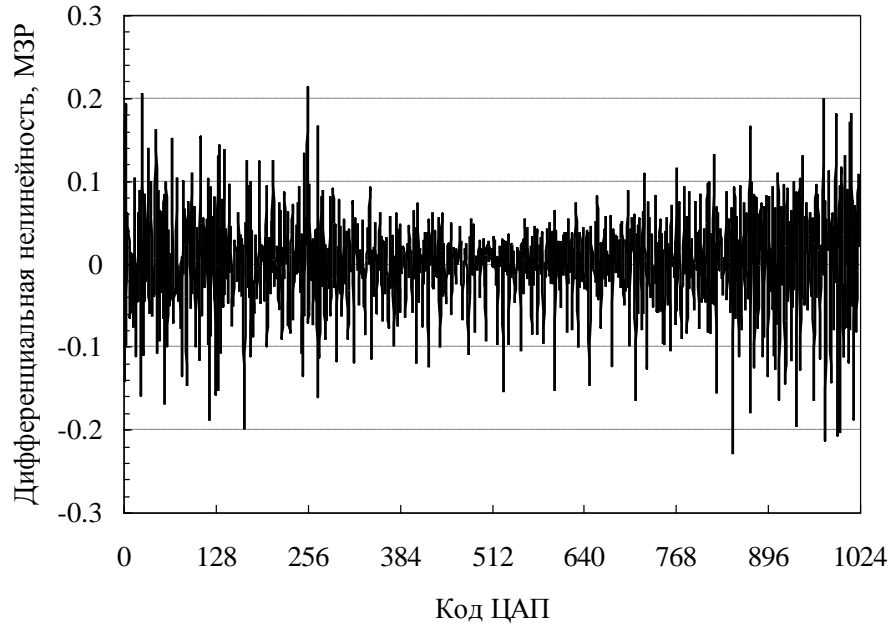


Рис.8. Дифференциальная нелинейность одного канала видеodeкодера

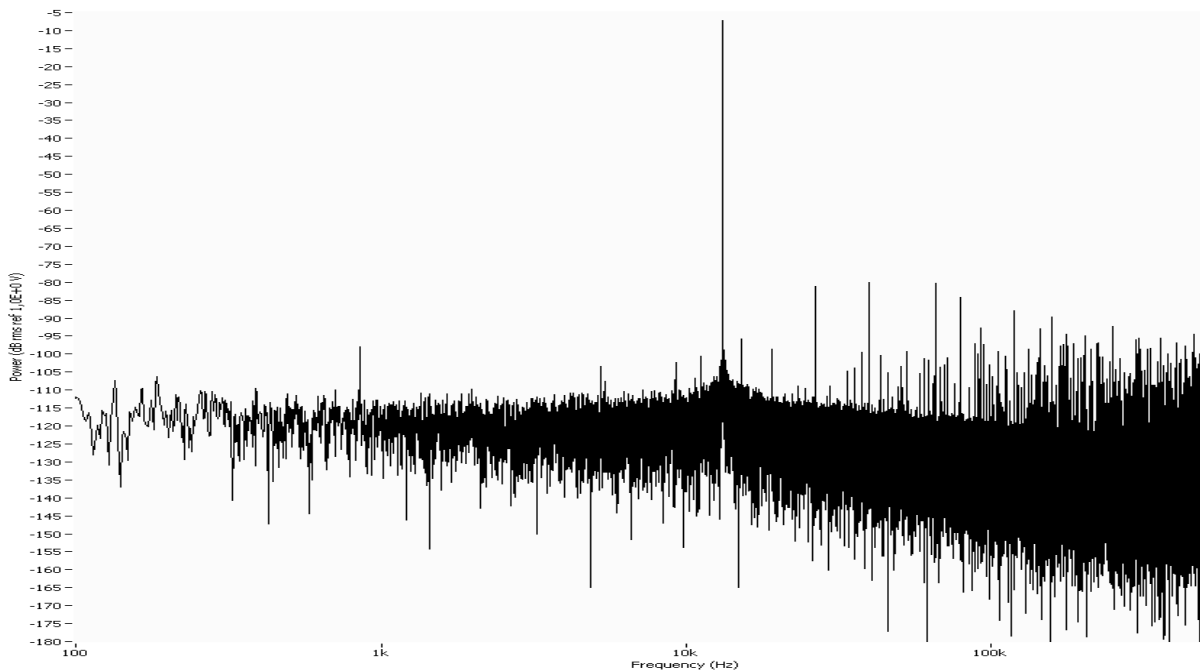


Рис.9. Спектр сигнала 13кГц при частоте дискретизации 27 МГц
(по оси абсцисс отложена частота, кГц, по оси ординат – мощность, дБ)

Сравнительный анализ полученных данных показал, что один из каналов видеodeкодера, а именно расположенный в нижней части чипа, см. рис. 2, систематически проявлял отличия интегральной и дифференциальной нелинейности от двух других, практически совпадающих друг с другом. Возможные причины такого отличия остались пока не ясными и требуют дополнительного исследования. Основным предположением является воздействие темпера-

турного градиента на матрицу единичных генераторов тока, проявляющееся вследствие температурной зависимости порогового напряжения. В свою очередь, температурный градиент может быть обусловлен влиянием элементов ввода-вывода, работающих на максимальной частоте.

В частности, чувствительность характеристик аналоговых блоков к способу их размещения в микросхемах отмечалась ранее [2].

По совокупности измеренных характеристик экспериментальных образцов микросхемы был сделан вывод о том, что разработанный СФ-блок видеodeкодера полностью отвечает заявленным техническим требованиям.

Для изготовления аналоговых блоков использовалась единственная доступная в начале разработки опция изготовления конденсаторов типа МИМ, где в качестве изолятора применяется низкотемпературный нитрид кремния, получаемый путём дополнительной активации газовой смеси исходных реагентов. Как показали результаты обследования разработанных приборов, этот тип конденсатора позволил получить необходимые параметры микросхемы. Однако из литературы хорошо известно, что низкотемпературные слои нитрида кремния не стехиометричны и, в частности, содержат водород с концентрацией в десятки атомных процентов [3]. Несовершенство структуры такого изолятора вызывает т.н. «эффект памяти» конденсаторных структур, вызывающий ухудшение интегральной и дифференциальной нелинейности цифро-аналоговых микросхем [4]. Дополнительным важным основанием в пользу возможности потенциального влияния нарушений стехиометрии нитрида кремния являются экспериментальные данные, свидетельствующие о необходимости тщательной оптимизации плазменного процесса осаждения, а именно состава и электрофизических характеристик тонкого слоя нитрида кремния по площади кремниевой подложки [5], которая в современном серийном производстве имеет диаметр как минимум 200 мм.

В более позднее по времени обновлении правил проектирования фабрики-изготовителя чипов кроме использованного в данной работе конструктивного варианта МИМ-конденсаторов была введена опция конденсатора т.н. конструкции «Finger». Ввиду того, что в этом варианте конденсаторной структуры не используется нитрид кремния, «эффекты памяти» для «Finger» конденсаторов не характерны и такие конденсаторы потенциально должны быть более стабильными. В связи с этим сравнительное исследование конденсаторов типа «Finger» для проектирования интегральных микросхем смешанного сигнала представляет большой интерес. Для обследования и сравнения двух типов конденсаторных структур был разработан и изготовлен специальный тестовый чип по технологии КМОП 0.18 мкм, включающий оба типа конденсаторов. Результаты сравнительного исследования использованных конденсаторных структур планируется представить в нашей следующей работе.

4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты успешной верификации «на кремнии» мультистандартного PAL/NTSC видеodeкодера, относящегося к классу твёрдотельных интегральных микросхем «смешанного сигнала», изготовленного на базе КМОП-технологии с проектно-технологическими нормами 0.18 мкм. Результаты работы подтверждают эффективность использованного алгоритма проектирования аналоговых СФ-блоков для микросхем типа СнК.

Разработанный чип включает цифровой блок и трёхканальный видео ЦАП, выполненный с использованием МИМ-конденсаторов с изолятором из низкотемпературного нитрида кремния. Верификация чипа «на кремнии» в виде микросхемы показала, что все электрические характеристики соответствуют исходным техническим требованиям. По измеренным основным характеристикам разработанная микросхема видеodeкодера при площади 1.56 мм² имеет ток потребления не более 27 мА при напряжении питания 3.3 В

(рассеяние мощности 89 мВт). При обследовании экспериментальных образцов чипа установлены 10 подтверждённых эффективных разрядов при рабочей частоте 27 МГц. Измеренная интегральная нелинейность не превышает ± 0.7 МЗР, дифференциальная нелинейность – ± 0.35 МЗР. Обнаруженное различие между каналами ЦАП по интегральной и дифференциальной нелинейности, по-видимому, обусловлены небольшими различиями в топологической реализации и требуют проведения дальнейшего исследования для выяснения причин этого явления. Тем не менее, обнаруженные различия не были заметны на качестве изображения телевизионной картинке при опробовании микросхемы в составе макета видеопреобразователя.

Разработанный трёхканальный мультистандартный PAL/NTSC видеodecoder может быть использован либо как встраиваемый СФ-блок в составе сложных мультимедийных микросхем типа СнК, или как отдельная интегральная микросхема для цифрового телевидения и мультимедийных приложений.

Литература

1. Хабаров П.С., Шлемин Д.Л., Лысь В.Д., Лебедев Ю.П., Попов Ю.Н. Проектирование сложнофункциональных блоков смешанного сигнала на основе КМОП технологии 0.18 мкм на примере микросхемы видеodecodera. Часть 1. Конструкция и топология микросхемы // Направлено для публикации в «Журнал радиоэлектроники».
2. Кириллова Е. Физическое проектирование прецизионных аналоговых блоков в цифро-аналоговых ИМС // Компоненты и технологии, 2007, № 6, с.154 – 163.
3. Cheng H.C. Dielectric and Polysilicon Film Deposition / In “ULSI Technology”, Edited by Chang C.Y. and Sze // McGraw-Hill International Editions, 1996, p.p.205-269.
4. Zanchi A., Tsay C.-Y., Papantonopoulos I. Impact of capacitor dielectric relaxation on a 14-bit 70-MS/s pipeline ADC in 3-V BiCMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, Vol. 38, no. 12, pp.2077 – 2086.
5. C.Y. Wang, E.H. Lim, V. Yu. Vassiliev, J.L.Sudijono, J.Z. Zhen, and A.Cuthbertson. Hydrogen Concentration Analysis in Sequentially Deposited Thin Films and Application of Surface Charge Analysis Techniques for Fast and Non-Destructive Characterization of PECVD Silicon Nitride. Proc. of 17th Int. VLSI Multilevel Interconnection Conf. (VMIC), Santa Clara, USA, June 2000, pp.411 – 413.

Статья поступила в редакцию 14.04.2011

Хабаров Павел Сергеевич

инженер ООО «СибИС» (630049, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300) тел. (383) 2-277-639.

Шлемин Дмитрий Львович

к.т.н., руководитель группы ООО «СибИС» (630049, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300), член IEEE, тел. (383) 2-277-639.

Лысь Василий Дмитриевич

руководитель группы ООО «СибИС» (630049, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300) тел. (383) 2-277-639.

Лебедев Юрий Павлович

ведущий инженер ООО «СибИС» (630049, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300) тел. (383) 2-277-639.

Васильев Владислав Юрьевич

д.х.н., профессор кафедры технической электроники СибГУТИ, зам. гендиректора ООО «СибИС» (630049, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300) тел. (383) 2-277-639, e-mail: vasiliev@sib-is.ru.

Попов Юрий Николаевич

Генеральный директор ООО «СибИС» (630049, Новосибирск, ул. Красный проспект 220, корп.2, офис 300) тел. (383) 2-277-639.

**Designing of Complex-Functional Blocks of Mixed Signal on the Basis of Sub-Micron Technology Illustrated by Videoencoder Micro-Chip
Part 2. "Silicon" Microchip Verification**

Khabarov P. S., Shlemin D. L., Lys V. D., Lebedev Y. P., Vasilyev V.Yu., Popov Yu. N.

A three-channel multi-standard PAL/NTSC mixed-signal video encoder IP core for digital TV and multimedia applications has been designed. The IP core has been manufactured using a standard 0.18 μm CMOS technology flow with analog options. In the second part of the paper, results of the IP core investigation are presented. A few chip scanning electron microscopy cross-sectional images are presented. Total power dissipation has been measured to be 89 mW. Measured DAC parameters show 10 bit 27 MHz performance. The measured integral nonlinearity and differential nonlinearity are ± 0.7 LSB and ± 0.35 LSB, respectively. This chip design can be used from digital to analog video encoding either separately, or as an IP core. Range of application of this integrated circuit is from consumer digital TV to a security applications and some special uses.

Keywords: IP core, PAL/ NTSC video encoder, DAC, modulator.