

К. ф.-м. н. В. В. БРАЙЛОВСКИЙ, А. Д. ВЕРИГА,
д. т. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ

Украина, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича
E-mail: brailovsky@ukr.net, veriga@ukr.net

Дата поступления в редакцию
13.07 2009 г.

Оппонент д. т. н. С. М. СМОЛЬСКИЙ
(ИРЭ МЭИ, г. Москва)

ГИБРИДНЫЙ АВТОДИННЫЙ СЕНСОР МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Разработан автодинный сенсор, который позволяет проводить наблюдения геликонного резонанса однокатушечным методом и получать сигналы ЭПР, определять кинетические характеристики полупроводниковых материалов бесконтактным методом на частотах ~500 МГц в температурном диапазоне 77—300 К.

Автодины — автогенераторы слабых колебаний широко используются в радиоспектроскопии. Достаточно высокая чувствительность к изменению потерь в колебательном контуре позволяет использовать их для детектирования слабых сигналов методами ЯМР и ЯКР [1]. Кроме того, эти устройства с успехом могут использоваться для наблюдения размерных резонансов, в частности геликонов [2]. Использование размерных резонансов позволяет проводить измерение кинетических характеристик полупроводниковых материалов бесконтактным методом [3], что ускоряет процедуру измерения в сравнении с методом Холла, в том числе для тонкопленочных материалов, сформировать омические контакты для которых технически очень трудно.

Целью данной работы являлась разработка автодинного сенсора, позволяющего проводить наблюдения геликонного резонанса однокатушечным методом интерферометрии для бесконтактного определения кинетических характеристик полупроводниковых материалов. Практический интерес представляют измерения в области от азотной до комнатной температуры. При этом выдвигаются повышенные требования к обеспечению его верхней рабочей частоты (500 МГц) и к уровню его собственных шумов.

Для уменьшения влияния соединительной линии с эквивалентной емкостью C_3 на параметры колебательного контура схема разработанного автодина разделена на две части — одна находится при комнатной температуре, другая вынесена в рабочую зону [4], которая предусматривает наличие однородного магнитного поля определенной напряженности и поддержание низкой температуры для снижения уровня собственных шумов автодина (рис. 1). Взаимодействие контура с образцом приводит к изменению амплитуды высокочастотных колебаний, генерируемых автодинным сенсором. Огибающая (низкочастотный сигнал) выделяется из высокочастотного модулированного сигнала этим же автодинным сенсором в результате так называемого стокового детектирования [5]. Длина соединительной линии не оказывает ощутимого влия-

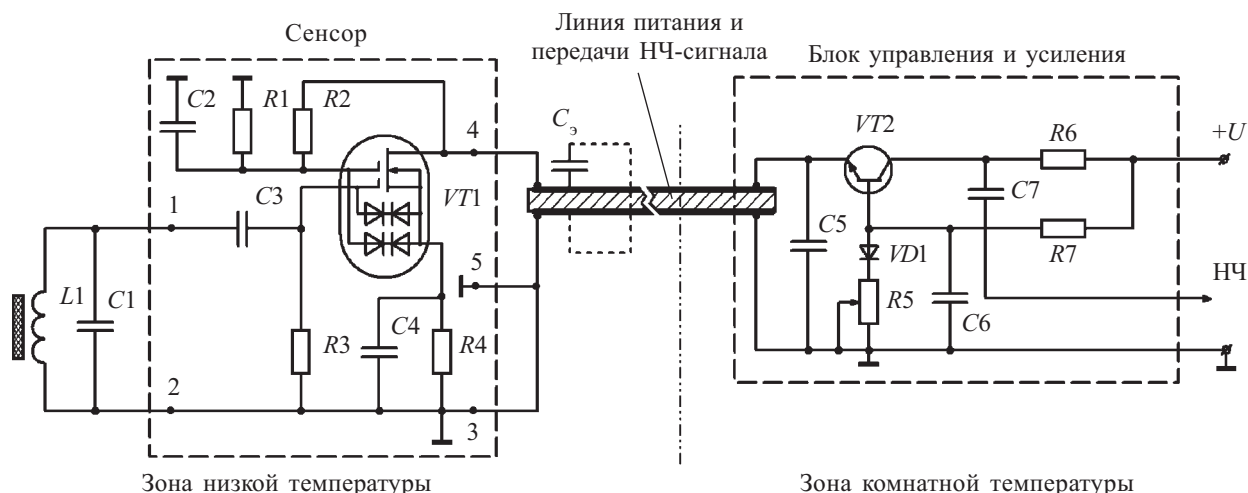


Рис. 1. Электрическая схема автодинного детектора [4]:

VT1 — BF998; VT2 — КТ3107А; VD1 — КД522А; L1 — 0,1 мкГн; C2 — 1000 пФ; C3 — 3 пФ; C4 — 2 пФ; C5 — 10 нФ; C6 — 10 мкФ; C7 — 1 нФ; R1 — 47 кОм; R2 — 30 кОм; R3 — 100 кОм; R4 — 130 Ом; R5, R6 — 1 кОм; R7 — 2 кОм

ния на частотные свойства автодина, поскольку по ней передается только низкочастотный звуковой диапазон.

Чувствительность автодина как датчика магнитного резонанса определяется прежде всего его шумовыми характеристиками, а они, в свою очередь, зависят от компонентной базы и режимов их работы. В случае объемных резисторов спектральная плотность флуктуаций напряжения растет пропорционально квадрату величины протекающего тока [6]. Уменьшить уровень собственных шумов автодина можно заменой объемных резисторов на пленочные металлические [7]. Тонкопленочные резисторы, в отличие от толстых пленок, характеризуются меньшим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), в некоторых случаях даже отрицательным (для металлов), что позволяет использовать их для работы в широком диапазоне температур, в том числе и отрицательных. Обеспечение работоспособности автодина в широком температурном диапазоне требует обеспечения малой теплоемкости всех его элементов и надежного теплового контакта между элементами схемы. Для этого автодинный сенсор был разработан в виде гибридной интегральной микросхемы (ГИМС).

Схема сенсора (см. рис. 1) содержит малое число элементов и компонентов, имеет малую мощность, поэтому ее можно выполнять одноуровневой тонкопленочной методом фотолитографии с использованием фоторезиста ФП-383. Размеры элементов фотошаблонов подбирались с учетом подтравливания. Стравливание рисунка слоев осуществлялось химическим методом [8, 9], травители подбирались таким образом, чтобы обеспечивалось селективное травление материалов пленок.

Материал подложки необходимо выбирать согласно требованиям, которые выдвигаются к подложкам [10], а также учитывая специфические условия работы микросхемы. В нашем случае рабочий диапазон температур составляет 77—300 К, частота — 500 МГц, поэтому необходимо выбрать материал с хорошей теплопроводностью и малыми диэлектрическими потерями на высоких частотах, а также иметь в виду плоскостность и шероховатость подложки, от которых зависит точность изготовления пассивной части микросхемы.

Из-за низкой теплопроводности стеклянные или стеклокерамические подложки выбирать нецелесообразно. Анализ характеристик других материалов, которые могут использоваться при высоких частотах [11, 12], показал, что материалом подложки может служить поликор или бериллиевая керамика, обладающие высокими прочностью и теплопроводностью.

Бериллиевая керамика имеет в 200—250 раз большую теплопроводность, чем стекло, хорошую механическую прочность и химическую стойкость, но не находит широкого применения из-за высокого уровня токсичности. Поэтому для подложки был выбран керамический материал поликор А-995А толщиной 0,6 мм.

Поликор (поликристаллический корунд Al_2O_3) не уступает бериллиевой керамике по всем параметрам (кроме теплопроводности, которая у него на порядок

ниже), к тому же он не токсичен и имеет малую шероховатость. Неровности поликора по отношению к толщине наносимых пленок имеют приемлемую величину, так что полирование можно не применять. На такие платы возможна установка компонентов в микнорпусах, предназначенных для поверхностного монтажа [13].

При расчете геометрических размеров элементов схемы задавали их конструктивные и технологические параметры [10, 14, 15]. Для резисторов это: номинальное сопротивление, относительная погрешность номинального сопротивления ($\gamma_R=10\text{—}20\%$), номинальная мощность (мощность, рассеиваемая на резисторах, согласно расчетам не превышает 0,3—1 мВт), рабочая температура ($T=77\text{ К}$); абсолютная погрешность изготовления ($\Delta l=\Delta b=10\text{ мкм}$), абсолютная погрешность совмещения фотошаблона ($\Delta_p=0,1\text{ мм}$), относительная погрешность удельного сопротивления ($\gamma_p=0,01$). Для конденсаторов это: номинальная емкость, рабочее напряжение (приняли 12 В); погрешность размеров обкладок ($\Delta L=\Delta B=0,05\text{ мм}$), погрешность совмещения фотошаблона с подложкой ($\Delta l_k=0,1\text{ мм}$).

По величине сопротивления резисторы разделили на две группы. Для высокоомных резисторов выбрали материал кермет К-50С, для низкоомного резистора — нихром, т. к. они характеризуются низким ТКС, низким коэффициентом временной нестабильности (старения), высокой адгезией к поверхности подложки и технологичностью. Такой выбор материалов позволяет формировать пленки резисторов и контактных площадок и подслоя для контактных площадок в едином технологическом цикле. К тому же, эти материалы имеют близкие по величине, но противоположные по знаку ТКС, поэтому при переходе от комнатной температуры к азотной влияние температуры на величину сопротивления в значительной степени будет скомпенсировано.

Таким образом была образована трехслойная структура. Для уменьшения паразитной индуктивности резисторов на высоких частотах они выполнялись в форме прямоугольника.

В схеме имеется два конденсатора малой емкости (2 и 3 пФ) и один — большой (1000 пФ). Конденсаторы малой емкости формируют на подложке из слоя проводника. Их емкость на 90% образована из паразитной емкости, обусловленной краевым эффектом. Результирующая диэлектрическая проницаемость диэлектрика такого конденсатора формируется за счет диэлектрической проницаемости подложки и защитного покрытия.

Для конденсатора емкостью 1000 пФ в качестве изолирующего слоя на периферии и диэлектрика между обкладками использован диоксид кремния, т. к. технология его напыления хорошо отработана, а воспроизводимость достаточно высока. С целью предотвращения возможного замыкания обкладок конденсатора в процессе формирования соединительных дорожек формирование конденсатора проводилось в два этапа. Сначала формировалась нижняя обкладка, потом диэлектрик и верхняя обкладка, образованная из двух слоев — диоксида кремния и алюминия. Такая последовательность исключает лишнее стравли-

Характеристики слоев микросхемы

Наименование слоя	Материал	Электрическая характеристика	Толщина, нм	Метод нанесения	Травитель
Резисторы высокоомные	Кермет К-50С	5000 Ом/□	100	Термическое напыление	HF:HCl:NH ₄ F:H ₂ O
Резистор низкоомный, подслой контактных площадок резисторов высокоомных	Нихром	300 Ом/□	40	Термическое напыление	HNO ₃
Контактные площадки резисторов высокоомных	Золото	—	10	Термическое напыление	HCl и HNO ₃
Нижняя обкладка конденсатора	Алюминий А99	—	200	Плазменное напыление: метод катодного распыления	NaOH
Диэлектрик конденсатора	Диоксид кремния	22000 пФ/см ²	200	Плазмохимическое осаждение	HF:NH ₄ F:H ₂ O
Верхняя обкладка конденсатора	Алюминий А99	—	200	Плазменное напыление: метод катодного распыления	NaOH
Проводники, контактные площадки	Медь	—	3000	Плазменное напыление: метод катодного распыления	CuCl ₃
Защитное покрытие					

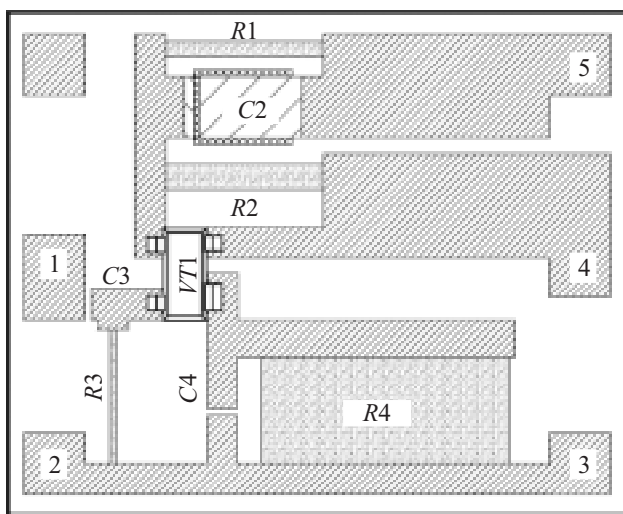


Рис. 2. Топология гибридной схемы: 1—5 — номера выводов (нумерация элементов соответствует схеме на рис. 1)

вание нижней обкладки (поскольку травитель для обеих один и тот же).

Монтаж транзистора осуществлялся по технологии SMD-монтажа. Пайку проводили припойной пастой SN62RM89AA-S85(Multicore) в соответствии с температурным профилем пайки, после чего выполняли термоциклирование [16].

С целью обеспечения надежности электрических контактов выводы микросхемы выполнялись с зажимом [10]. От влияния внешней среды ГИМС защищено покрытием из компаунда [17].

Топология предлагаемой гибридной схемы представлена на рис. 2. В таблице приведены характери-

стики материалов слоев, методы их нанесения и соответствующие селективные травители. Очередность нанесения слоев соответствует последовательности их представления в таблице.

Таким образом, спроектирована и изготовлена по тонкопленочной технологии гибридная интегральная микросхема автодинного сенсора на частоту 500 МГц с диапазоном рабочей температуры 77—300 К. Коэффициент шума такого автодина понизился на 2 дБ в сравнении с автодином, выполненном на дискретных элементах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ядерный магнитный резонанс / Под ред. П. М. Бородин. — Л.: Издательство ленинградского университета, 1982.
2. Хандожко А. Г., Слынько Е. И., Черныш И. П. Автодинный детектор для исследования ядерного магнитного резонанса и размерных эффектов в полупроводниках // Приборы и техника эксперимента. — 1988. — № 5. — С. 110—112.
3. Пожела Р. Ю., Толутис Р. Б., Эберсон Т. С. Бесконтактное измерение подвижности и концентрации носителей тока в полупроводниках // Приборы и техника эксперимента. — 1986. — № 1. — С. 185—187.
4. Пат. 41825 України. Автодинний детектор магнітного резонансу дециметрового діапазону / Браїловський В. В., Верига А. Д., Хандожко О. Г. — 2009. — Бюл. № 11.
5. Браїловський В. В., Верига А. Д., Хандожко О. Г. Ефективність стокового детектування в автодинному спіні-детекторі // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка. — 2004. — Вип. 201. — С. 110—112.
6. Головки А. Г. Механізм виникнення шумових максимумів в елементах з нелінійними вольт-амперними характеристиками // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. — 2004. — № 3. — С. 58—61.
7. www.km-cs.com/catalog/Catalog_Res.pdf

8. Черняев В. Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА.— М.: Высш. школа, 1987.
9. Шмаков М., Паршин В. Школа производства ГПИС. Фотолитография. Третий этап — передача рисунка на материал интегральной микросхемы // Технологии в электронной промышленности.— 2007.— №5.— С. 72—77.
10. Березина А. С., Мочалкина О. Р. Технология и конструирование интегральных микросхем.— М.: Радио и связь, 1983.
11. Кренделев А. Е. Технологические средства изготовления микрополосковых линий для ГИС КВЧ-диапазона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— №4—5.— С. 34—39.
12. Акимов А. И. Керамические диэлектрики для высокочастотной техники // Сб. докл. междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела».— Белоруссия, г. Минск.— 2005.— С. 17—19. ([ifftp.bas-net.by/files/ftt2005/1_17.pdf](http://ftp.bas-net.by/files/ftt2005/1_17.pdf))
13. Спирин В. Г. Перспективы развития тонкопленочных микросборок // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 1.— С. 3—6.
14. Спирин В. Г. Компенсация систематических погрешностей тонкопленочных элементов через элементы фотошаблона // Там же.— 2004.— № 4.— С. 9—11.
15. Спирин В. Г. сопротивление контактов тонкопленочного резистора // Там же.— 2008.— № 5.— С. 20—23.
16. Шохин А. В. Типовой технологический процесс монтажа печатных плат с применением SMD-компонентов.— С.-Пб.: РАР, 2000.
17. Попова Г. Е. Использование эпоксидных компаундов для герметизации полупроводниковых приборов и микросхем.— М.: Энергия, 1985.