

единицам ИАС НКАУ обрабатывать только ту часть данных, за которую они ответственны;

— удобный интерфейс доступа к данным или предоставления информации для лиц, которые ответственны за данную информацию или за принятие решений;

— возможность удаленного централизованного управления распределенными узлами хранения данных;

— соблюдение установленных правил целостности данных для всей базы данных;

— возможность архивации всей информации, хранящейся в базе данных, с необходимой периодичностью;

— восстановление данных в случае сбоев системы или повреждения данных.

В состав ИАС НКАУ входит и ряд обеспечивающих подсистем.

Подсистема автоматизированного управления обеспечивает оперативное управление, автоматизацию процессов доставки информации по каналам передачи данных, автоматизацию отдельных мероприятий по подсистемам защиты информации и подсистемам эксплуатации.

Подсистема обеспечения безопасности и целостности передачи информации предназначена для обеспечения безопасности передачи информации в процессе функционирования ИАС НКАУ посредством мер организационного и технического характера. В рамках работ по подсистеме защиты информации должны быть определены виды конфиденци-

альной информации, объекты, где эта информация архивируется, информационные направления, по которым должна передаваться конфиденциальная информация, определены конкретные меры организационного и технического характера, препятствующие утечке информации.

Подсистема диагностики и состояния технических средств обеспечивает диагностирование состояния и поддержание нормального режима работы технических средств системы, обеспечивает возможности реконфигурации технических средств при решении тематических задач, требующих дополнительных технических ресурсов, и т. п.

Подсистема эксплуатации и ремонта обеспечивает проведение технического обслуживания и текущего ремонта.

Создаваемая информационно-аналитическая система НКАУ позволит обеспечить реализацию основных направлений в развитии инфраструктуры и функциональных возможностей космической отрасли Украины. ИАС НКАУ позволит посредством использования передовых информационных технологий обеспечить эффективное использование научно-технического потенциала космической отрасли, обеспечит создание условий для внедрения космических технологий в отрасли национальной экономики посредством использования для решения тематических задач данных, получаемых от космических средств.

Д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ

Азербайджан, г. Баку, Национальное аэрокосмическое агентство
E-mail: ssddb@azerin.com

Дата поступления в редакцию
17.07 2003 г.

Оппонент к. ф.-м. н. К. В. КОЛЕЖУК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ НЕГАТРОНИКИ

Показаны успехи негатроники. Изложен взгляд на перспективы использования микроэлектронной негатроники, в том числе бионегатроники.

В последнее время благодаря усилиям научных школ России, Украины и Азербайджана сформировалось и успешно развивается новое направление функциональной электроники — негатроника [1].

Впервые формулировка научного направления негатроники была дана на Всесоюзных научно-технических семинарах по приборам с отрицательным сопротивлением, проводившихся в 1980-х годах в Москве под руководством автора первой монографии по этому направлению, профессора С. А. Горяинова [2]. Окончательное уточнение терминологии, определение задач и целей негатроники произошло в октябре 1991 г. в Баку, на 1-й (и последней, по причине распада СССР) Всесоюзной конференции «Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе», в которой, несмотря на тревожное время,

участвовали ученые из более чем 20 городов СССР [3]. Большая заслуга в развитии негатроники принадлежит школам проф. Филинюка Н. А. (Винницкий технический университет) и Негоденко О. Н. (Таганрогский радиотехнический университет), во многом благодаря работам которых негатроника прошла в своем развитии два этапа — полупроводниковый и схемотехнический.

В настоящее время совместными усилиями упомянутых выше школ и ученых Азербайджанского национального аэрокосмического агентства (АНАКА) развивается новое направление данной отрасли — микроэлектронная негатроника [4—6]. О последних достижениях и перспективах развития этого направления докладывалось на 4-й Международной научно-практической конференции по современным информационным и электронным технологиям, проходившей в мае 2003 г. в Одессе [7].

Начало развития твердотельной негатроники было положено открытием эффекта отрицательного сопротивления (ОС) и переключения в стеклообразных полупроводниках [8—10]. В дальнейшем

большой вклад в исследование пленочных элементов и структур внесли также азербайджанские ученые [11—14]. Однако область применения стеклообразных полупроводников ограничивается нестабильностью электрических характеристик, сложностью точного воспроизведения нужного состава многокомпонентного материала, деградацией омических контактов вследствие разъедания их со стороны халькогенидных материалов и, наконец, нестыковкой параметров и технологии изготовления с кремниевой микроэлектронной технологией.

Дальнейшему развитию микроэлектронной негatronики послужила разработка технологии одновременного выращивания моно- и поликристаллических пленок кремния в едином процессе эпитаксиального наращивания на общей подложке [15]. Наличие области пространственного заряда на границах зерен пленок поликристаллического кремния (ППК), обусловленной захватом носителей на глубокие ловушки, и возможность управлять размерами зерен и степенью их легирования при выращивании пленок технологическим путем позволяют получать широкий набор физических свойств и функциональных возможностей [16].

Пленки толщиной 5—10 мкм выращиваются в хлоридном процессе на кремниевых подложках *p*-типа проводимости (КДБ-10), на которых с помощью окисления и фотолитографии предварительно формируются локальные участки SiO₂ с нанесенной на них затравкой, представляющей собой тонкие слои ППК (~100 Å), осажденные в силановом процессе. При промышленном хлоридном эпитаксиальном выращивании пленки легируются фосфором до концентрации 2·10¹⁵—10¹⁶ см⁻³, что соответствует величине, необходимой для изготовления в монокристаллических участках элементов логических или линейных ИС. При этом на участках SiO₂ с затравкой растут локальные ППК. Размеры зерен формируемых ППК и, соответственно, концентрацию легирующей примеси в них можно варьировать температурой осаждения затравки в силановом процессе в диапазоне 800—860°C.

При исследовании ВАХ локальных ППК со средней концентрацией легирующей примеси в них был обнаружен эффект ОС и бистабильного переключения с памятью [17].

При измерении ВАХ сразу после выращивания переключение было моностабильным: при достижении некоторого порогового напряжения порядка 80—120 В на ВАХ появлялся участок ОС S-образного типа, симметричный относительно полярности приложенного смещения. После электрической формовки, заключающейся в пропускании импульсов тока, ВАХ приобретали диодный характер, при этом пороговые напряжения уменьшались на порядок, а сам эффект становился бистабильным и полярно-зависимым — переход из низкоомного состояния в высокоомное и обратно происходил при противоположных полярностях смещения.

Согласно известным представлениям, проводимость ППК определяется проводимостью объема зерен и межзеренных прослоек. Часть примесных атомов сегрегируется на границах зерен и остается

электрически нейтральной, оставшиеся примесные атомы распределяются в объеме зерен и ионизируются. Существующие на границах зерен глубокие ловушки захватывают свободные носители, создавая потенциальные барьеры, ограничивающие проводимость и подвижность носителей.

Путем исследования статических и динамических ВАХ переключающих ППК, температурной зависимости проводимости и холловской подвижности носителей заряда было показано, что эффекты памяти и переключения обусловлены процессами релаксации и перезарядки глубоких ловушек, существующих на границах зерен ППК [18].

В отличие от приборов на аморфных стеклообразных полупроводниках, пороговые напряжения которых зависят от числа переключений, ППК обладали устойчивым пороговым напряжением, не зависящим от номера включения при наработке более чем 10⁸ переключений. Хранение элементов в течение нескольких лет при отключенном питании в высокоомном (R_{bc}) и низкоомном (R_{nc}) состояниях не привело к изменению электрических сопротивлений в пределах погрешности измерения, причем отношение R_{bc}/R_{nc} превосходило три порядка [19].

При исследовании вольт-фарадных характеристик (ВФХ) на мосте полных проводимостей Л2-7 в диапазоне частот 0,465—10 МГц было обнаружено, что при определенных напряжениях емкость меняет свой знак с положительного на отрицательный, т. е. происходит инверсия характера реактивной проводимости с емкостного на индуктивный [20]. Как известно, отрицательная емкость C^- и индуктивность связаны между собой следующим соотношением [21]:

$$L = R^2 C^2 / (1 + Q_L^2), \quad (1)$$

где Q_L — добротность индуктивности.

Как было нами показано в [22], из (1) следует, что

$$\left. \begin{aligned} L &= 1/\omega^2 C^- \text{ при } Q_L \gg 1 \\ L &= R^2 C^- \text{ при } Q_L \ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При значениях Q_L , близких к 1, точные значения L , соответствующие измеренным значениям отрицательной емкости, можно определить из выражения (1). Табличные значения индуктивности ППК, приведенные в [22], показывают, что локальные поликремниевые пленки могут использоваться в качестве реактивных элементов твердотельных ИС.

В [22] и [23] было описано явление исчезновения под влиянием света участка ОС на ВАХ ППК, для восстановления которого требовалось увеличение приложенного напряжения смещения. Этот эффект также обусловлен наличием глубоких ловушек на границах зерен ППК, захватывающих носители зарядов, рожденные под влиянием света, что повышает высоту потенциальных барьеров и исключает условия возникновения ОС.

Воздействие света на параметры негatronов и возможность управления ими — оптонегатронный эффект — обсуждался в [24]. Разработка оптонегатронных элементов дает возможность создавать управляемую светом генерацию электрических колебаний, на основе которой можно строить оптические системы дистанционного управления.

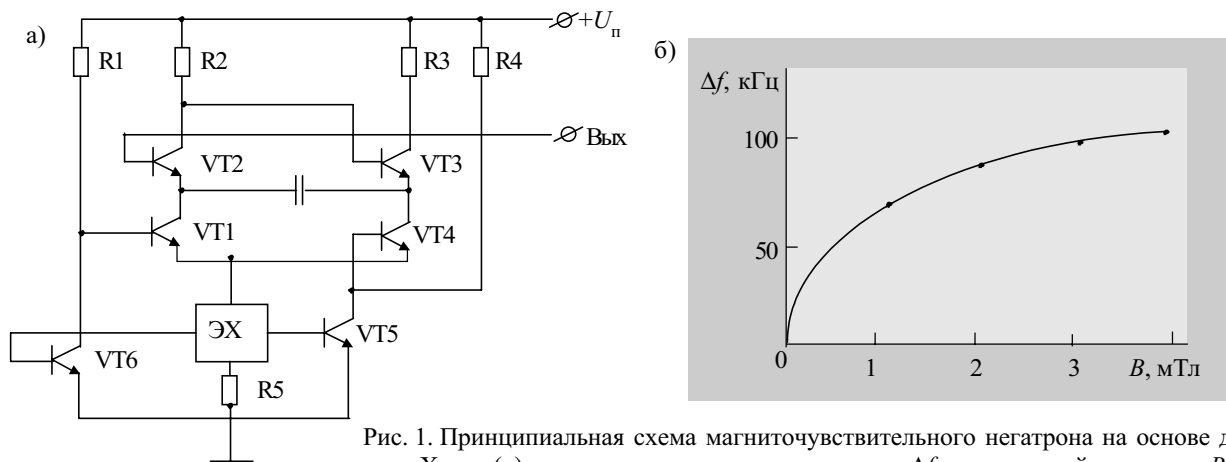


Рис. 1. Принципиальная схема магниточувствительного негatronа на основе датчика Холла (а) и зависимость изменения частоты Δf от магнитной индукции B (б)

Сочетание в едином кристалле чувствительных элементов, созданных в ОКБ космического приборостроения АНАКА, со схемами аналогов негatronов кафедры МЭТ БИС Таганрогского государственного радиотехнического университета позволило в рамках межгосударственного научно-технического сотрудничества создать микроэлектронные негatronные преобразователи неэлектрических величин [25—29].

Показанная на рис. 1 гибридная магниточувствительная ИС со схемой негatronа содержит элемент Холла (ЭХ), включенный в автогенератор на транзисторном аналоге негatronа. Направление магнитной индукции выбрано таким образом, что с ее увеличением частота возрастает. При увеличении магнитной индукции на 0,4 мТл частота изменялась на 40% своего первоначального значения.

В датчике магнитного поля на гальваномагнито-рекомбинационном (ГМР) эффекте сенсором служат два полупроводниковых резистора, изолированных обратносмещенным $p-n$ -переходом и разделенных между собой узкой поликремниевой полоской (дифференциальный ГМР-элемент) [28]. Для получения чувствительного элемента на кремниевой подложке p -типа после формирования полоски из SiO_2 с затравкой в едином эпитаксиальном процессе выра-

щивается пленка n -типа толщиной 10 мкм с локальной ППК над SiO_2 . Топология дифференциального ГМР-элемента показана на рис. 2, а на рис. 3 приведена микрофотография кристалла магниточувствительной ИС на основе ГМР с линейным выходом.

Двухэлектродная конструкция, в отличие от четырехэлектродного датчика Холла, обеспечивает высокую стабильность характеристик — ввиду отсутствия временных и температурных дрейфов под влиянием перераспределения упругих механических напряжений во время нагревания в процессе протекания рабочих токов. Усиленные схемой сигналы с ГМР-элемента подаются на негatronную схему, описанную в [25], благодаря чему эти функциональные элементы способны передавать на расстояние информацию о величине магнитных полей в месте измерения.

В [30] приведено большое число применений магниточувствительных датчиков, которые могут служить индикаторами конечного положения, углового и линейного перемещения, направления скорости вращения, расхода жидкости и газа, бесконтактного переключателя, измерителя тока и напряжения и др. Информация о всех этих величинах может быть передана на расстояние с помощью негatronных устройств, а микроэлектронная технология позволит сделать их дешевыми, надежными и миниатюрными, т. е. при-

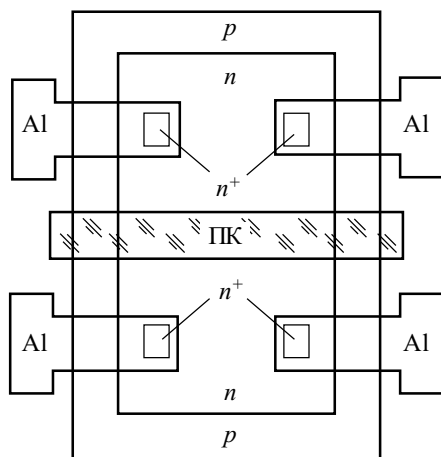


Рис. 2. Топология дифференциального ГМР-элемента

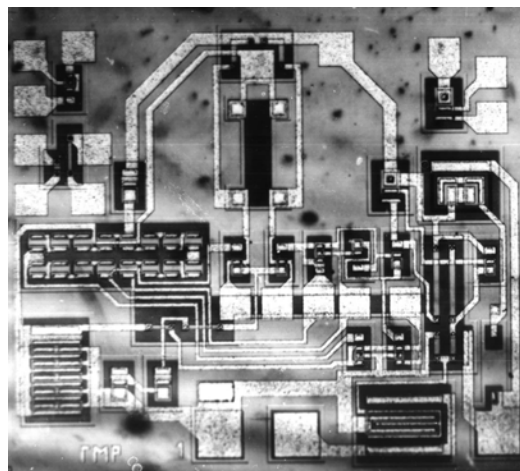


Рис. 3. Кристалл магниточувствительной ИС на основе ГМР с линейным выходом

годными для эффективного решения задач дистанционного зондирования.

Каковы дальнейшие перспективы развития микроэлектронной негатроники? Это, прежде всего, создание негасенсоров различных физических величин и интегральных преобразователей на их основе с частотным выходом в едином интегральном исполнении.

Существенные результаты следует ожидать в области СВЧ-техники, где повышение частотного диапазона может быть связано с применением полупроводниковых индуктивностей на ППК в твердотельных ИС [24].

Негатроны остаются также одними из перспективных элементов по созданию принципиально новых процессоров на базе нейристорных функциональных схем, развитие которых может послужить началом новой ветви негатроники — бионегатроники, способной, на наш взгляд, на основе единого закона — положительной обратной связи — объединить такие разные процессы, как, например, ударная ионизация в твердых телах, самовозбуждение в психике человека или неуправляемое поведение толпы.

Подобно тому, как кибернетика является наукой об управлении в механических системах и живых организмах на основе отрицательной обратной связи, бионегатроника станет ветвью кибернетики по изучению условий управления процессами генерации в организмах и обществе на основе положительной обратной связи.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А. и др. Негатроника. — Новосибирск: Наука, 1995.
- Гаряинов С. А., Абезгауз И. Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. — М.: Энергия, 1970.
- Филинчук Н. А. Негатроника — достижения и перспективы // Тез. докл. Всесоюз. НТК "Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе". — Баку, 1991. — С. 11—17.
- Касимов Ф. Д., Агаев Ф. Г., Филинчук Н. А. Физико-технические и схемотехнические особенности проектирования микроэлектронных преобразователей на основе негатронов. — Баку: Элм, 1999.
- Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю., Негоденко О. Н., Румянцев К. Е. Микроэлектронные преобразователи на основе негатронных элементов и устройств. — Баку: Элм, 2001.
- Касимов Ф. Д. Микроэлектронная негатроника — новое направление функциональной электроники // Микросистемная техника. — 2003. — № 4. — С. 6—9.
- Касимов Ф. Д. Состояние и перспективы развития твердотельной негатроники / Тр. 4-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса. — 2003. — С. 311.
- Коломиец Б. Т., Лебедев Э. А., Таксами И. А. Основные параметры переключателей на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // ФТП. — 1969. — № 5. — С. 731—735.
- Орешкин П. Т., Глебов А. С., Петров И. М. Элементы и ячейки памяти на основе аморфных полупроводников // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 1973. — Т. 16, № 4. — С. 81—86.
- Пат. 3271546 США. Переключающий прибор / С. Р. Овшинский. — 1986.
- А. с. 599684 СССР. Полупроводниковый переключатель с памятью // Г. Б. Абдуллаев, А. Л. Шабалов, А. Г. Абдуллаев, Т. К. Исмаилов — 1978.
- Алиев Н. А., Тагиев Б. Г., Мамедов Г. М. Остаточная проводимость и отрицательное дифференциальное сопротивление N- и S-типа в GaSeSn / В кн.: Физические свойства сложных полупроводников. — Баку: Элм, 1983. — С. 48—54.
- Искендер-заде З. А., Ахундов М. Р., Джафарова Э. А. Электрические свойства Al—SiO₂—nSi-структур // Докл. АН СССР. — 1978. — № 7. — С. 17—21.
- Алекперова Ш. М., Ветхов В. А., Гаджиева Р. С. и др. Эффекты отрицательного сопротивления и переключения пленочных структур МДП и МПМ // Радиотехника. — 1986. — № 2. — С. 32—35.
- Abdullayev A. G., Kasimov F. D., Mamikonova V. M. The simultaneous growth of mono- and polycrystalline silicon films with controlled parameters // Thin Solid Films. — 1984. — Vol. 115, N 3. — P. 237—243.
- Касимов Ф. Д. Физические свойства и функциональные возможности локально выращенных пленок моно- и поликристаллического кремния // Тез. докл. 12-й Всесоюз. конф. по микроэлектронике. Ч. 2. — Тбилиси. — 1987. — С. 175—176.
- Гезалов Б. А., Касимов Ф. Д., Ветхов В. А. Электрическая неустойчивость в локально выращенных пленках поликристаллического кремния // Письма в ЖТФ. — 1983. — Т. 9, вып. 24. — С. 1523—1526.
- Касимов Ф. Д., Кучис Е. В., Мамиконова В. М. и др. Исследование механизма переключения ППК с помощью эффекта Холла // Литовский физический сборник. — 1990. — Т. 30, № 1. — С. 67—71.
- А. с. 1077519 СССР. Полупроводниковый переключатель / Ф. Д. Касимов, Б. А. Гезалов, Т. К. Исмаилов и др. — 1983.
- Kasimov F. D. Inductivity phenomenon in local polycrystalline silicon films // Thin Solid Films. — 1986. — Vol. 138, N 1. — P. 43—47.
- Дешевой А. С., Гасанов Л. С. О твердотельной индуктивности в аморфных и компенсированных полупроводниках // ФТП. — 1977. — Т. 11, вып. 10. — С. 1995—1999.
- Касимов Ф. Д., Рагимов М. Р. Негатронные элементы на основе локальных пленок поликристаллического кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 1. — С. 53—56.
- Касимова Ф. Ф., Джавадов Н. Г. Стимулированное светом отрицательное сопротивление в кремниевых p—n-переходах с поликристаллической базой // Известия вузов. Сер. Электроника. — 1999. — № 1—2. — С. 47—51.
- Филинчук Н. А. Оптонегатроны и их применение / Тр. 4-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса. — 2003. — С. 320.
- Касимов Ф. Д., Негоденко О. Н., Касимова Ф. Ф. и др. Негатронный преобразователь магнитного поля для дистанционных измерений // Сб. тр. Междунар. НТК «Приборостроение». Ч. 2. — Винница—Симеиз. — 1997. — С. 275.
- Бедуев В. Л., Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные трансдьюсеры магнитного поля с частотным выходом // Тез. докл. Всерос. НТК «Теория цепей и сигналов». — Таганрог. — ТРТУ. — 1996. — С. 56.
- Сеченов Д. А., Мамиконова В. М., Василенко А. Л. Гальваномангниторекомбинационный кремниевый интегральный преобразователь // Известия вузов. Сер. Электроника. — 2001. — № 2. — С. 71—74.
- Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю. Кремниевый интегральный гальваномангниторекомбинационный элемент // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 5—6. — С. 16—18.
- Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные датчики с частотным выходом на основе аналогов негатронов // Там же. — С. 19—22.
- Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника. — М.: ДМК Пресс, 2001.