

СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

УДК 658.01.56

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)

С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, И. И. Соколовский

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины “Трансмаг”,
ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, 49005, Украина.
Тел. (8056) 370-21-82, e-mail: plm@westa-inter.com, svp@westa-inter.com

Аннотация

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, И. И. Соколовский

Рассмотрены быстродействующие системы управления различного назначения (авионика, высокоскоростной наземный транспорт, распределенные энергетические системы, диагностико-терапевтические комплексы и др.). Проанализирована специфика больших многоуровневых систем управления со сложной иерархической структурой. Выделены основные функциональные задачи, возлагаемые на большие системы управления. Представлен интегрированный подход к построению их информационно-измерительных подсистем с использованием многообразия функциональных возможностей полупроводниковых устройств, проявляющих отрицательную дифференциальную проводимость в СВЧ диапазоне.

Ключевые слова: Большие системы управления, “горячие” электроны в полупроводниках, отрицательная дифференциальная проводимость, многофункциональные устройства СВЧ диапазона.

Анотація

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ШВИДКОДІЮЧИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

С. В. Плаксі́н, Л. М. Погорі́ла, І. І. Соколовський

Розглянуто швидкодіючі системи керування різного призначення (авіоніка, високошвидкісний наземний транспорт, розподілені енергетичні системи, діагностико-терапевтичні комплекси та ін.). Проаналізовано специфіку великих багаторівневих систем керування зі складною ієрархічною структурою. Виділено основні функціональні завдання, покладені на великі системи керування. Представлено інтегрований підхід до побудови інформаційно-вимірювальних підсистем з використанням різноманіття функціональних можливостей напівпровідникових пристроїв, що проявляють негативну диференціальну провідність у НВЧ діапазоні.

Ключові слова: Великі системи керування, “гарячі” електрони в напівпровідниках, негативна диференціальна провідність, багатофункціональні пристрої НВЧ діапазону.

Summary

PHYSICAL PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF FAST-ACTING INFORMATION-CONTROL SYSTEMS ON ELECTRICALLY ACTIVE SEMICONDUCTORS

Plaksin Sergey V., Pogorelaja Lubov M., Sokolovskiy Ivan I.

Fast-acting control systems for various purposes (avionics, the high-speed ground transport, the distributed power systems, diagnostic-therapeutic complexes, etc.) are considered. Specificity of big multilevel control systems with the complex hierarchical structure is analysed. The basic functional problems concerned of big control systems are selected. Integrated approach to building of information-measuring subsystems with use of variety of functionalities of the microwave semiconductor devices with the negative differential conductance is presented.

Keywords: big control systems, “hot” electrons in semiconductors, the negative differential conductance, microwave multifunctional devices.

Введение

Управление современными технологическими процессами, транспортными потоками, диагностико-терапевтическими комплексами предполагает осуществление анализа и контроля многочисленных параметров сложных многокомпонентных систем в реальном масштабе времени. Современные управляющие системы, особенно такие нетрадиционные их виды как системы авионики, системы управления высокоскоростным наземным транспортом, в том числе содержащие навигационные комплексы и комплексы коррекции функционального состояния производственного персонала, существенно усложнились за последние десятилетия, стали многофункциональными, требования к ним продолжают возрастать (экологическая чистота, безопасность, быстрдействие, эффективность, информа-

тивность). Поэтому определяющую роль для надежного функционирования таких сложных аппаратно-программных комплексов приобретают их информационно-управляющие системы (ИУС). Построение такой системы управления на базе хорошо отработанных датчиков и связующих звеньев, но выполненных на разнородной элементной базе и в основу работы которых положены разные физические явления, зачастую приводит к неоправданной громоздкости и к снижению надежности системы в целом. Поэтому, несомненно, актуальным представляется решение с единых позиций назревшей научно-технической проблемы: разработка надежной многофункциональной реконфигурируемой информационно-управляющей системы, способной учитывать специфику больших высокоскоростных систем, построенной на однородной элемент-

ной базе и проникнутой внутренне непротиворечивой логикой положенных в ее основу физических принципов.

Специфика больших многоуровневых систем управления

Для обоснования подходов к разработке метода синтезирования ИУС прежде всего необходимо проанализировать специфику больших многоуровневых систем управления со сложной иерархической структурой.

Таким системам (как правило, человеко-машинным) присущи характерные признаки больших систем (БС), выделенные еще пионерами системотехники Г.Х. Гудом и Р.Э. Макколом в их основополагающей книге [1]:

1. целостность, наличие у всей системы общей цели (предназначения);
2. большие размеры и по числу частей, и по числу выполняемых функций;
3. сложность поведения системы, когда изменение одной переменной вызывает изменения многих других;
4. нерегулярное (случайное) во времени поступление внешних воздействий;
5. высокая степень автоматизации процессов в системе.

Взросшие масштабы хозяйственной деятельности человека в последнее время вызвали обострение проблем связи, необходимость дальнейшего изучения природных ресурсов Земли, наблюдений за погодой, за экологическим состоянием окружающей среды, технологических исследований в области специального материаловедения, геофизических и астрофизических исследований. Региональные и даже глобальные масштабы этих проблем, в том числе по исследованию Земли и космического пространства, обуславливают особую роль космических средств в их решении.

В ряду общих проблем создания космических систем все более возрастает роль средств и методов управления полетом. В это понятие включен весь комплекс операций по управлению движением космических аппаратов в пространстве, сбору измерительной информации, ее контролю, моделированию полетных ситуаций, выработке управляющих решений, планированию полета, обработке и интерпретации результатов экспериментов и исследований в космосе, выполняемых непосредственно

на борту космического аппарата и (или) с помощью наземных средств.

Высокие требования к оперативности и эффективности управления полетом, разнесенность средств управления, специфика решаемых задач и многоплановость конечных целей полета определили, по сути дела, развитие проблемы управления полетом космических кораблей в отдельное направление техники управления движущимися объектами. Поэтому необходимы разработка специальной методологии работы, развитие новых приемов и средств обработки и передачи информации.

Действительно, для беспилотных космических кораблей телеизмерения являются единственным прямым источником информации о состоянии систем корабля и работе его научной аппаратуры (косвенными источниками сведений о функционировании аппаратуры корабля при маневрах могут быть, например, траекторные измерения). Отсюда очевидно, какое большое значение имеет правильная организация сбора и передачи телеметрической информации на Землю, ее последующая обработка и интерпретация в целях управления полетом космического корабля, повышения его эффективности, и совершенствования корабля в последующих запусках [2, 3].

Основное направление работы по разработке перспективных систем авионики, например, важнейшим компонентом которых являются современные образцы бортового радиоэлектронного оборудования, состоит в создании экспертных систем [4]. Чтобы отвечать мировым стандартам современные самолеты должны обладать “стеклянной” кабиной, современной вычислительной техникой, средствами связи. Их боевые модификации должны обеспечить работу летчика в условиях, когда на многоцелевом одноместном самолете он должен одновременно отражать воздушную атаку, лететь на малой высоте, поражать наземные цели, занимать место в группе и т. д. Экспертные системы позволят пилоту не ощущать дефицита времени и не усложнять свой мыслительный процесс вычислениями. В таких разработках предусматриваются подсистемы, обеспечивающие оценку психофизиологических возможностей человека [4].

На стадии интенсивного развития в передовых в технологическом отношении странах находится так называемый высокоскоростной

наземный транспорт (ВСНТ), и в особенности — с магнитной левитацией над путевой структурой [5,6]. В Украине также созданы экспериментальные образцы магнитолевитирующих транспортных средств (МТС) и испытательные полигоны (см. рис. 1), однако внедрение этого несомненно перспективного вида транспорта сопряжено с необходимостью разработки системы мониторинга и управления движением, включающей средства оперативного контроля состояния путевой структуры.

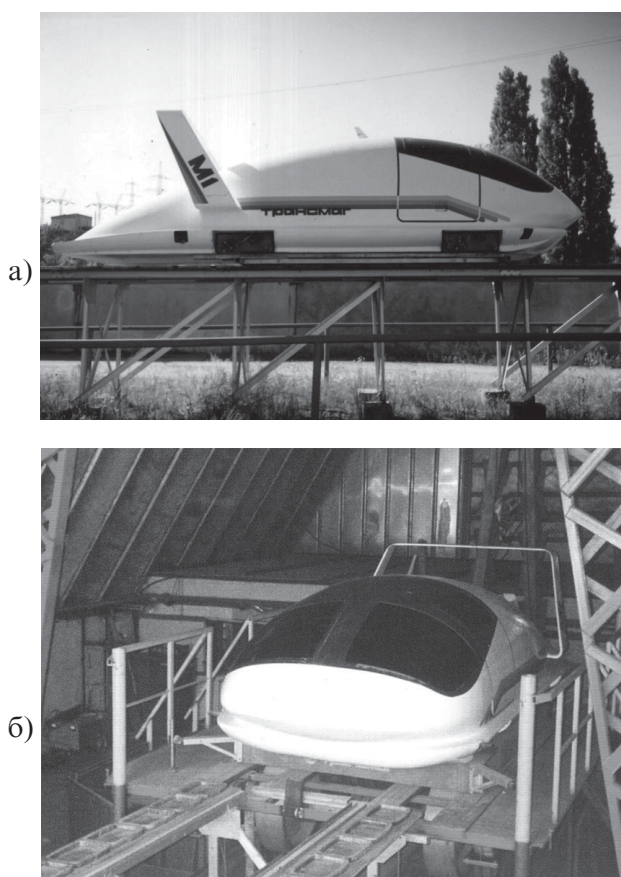


Рис. 1. Экспериментальный экипаж (а) и полигон (б) Института транспортных систем и технологий НАН Украины “Трансмаг”

Спецификой подлежащей разработке системы управления, отличающей ее от системы управления воздушным транспортом, а также от традиционного железнодорожного и автомобильного, является то, что функциональные узлы системы должны работать в условиях сильных магнитных полей, транспортный экипаж, движущийся со скоростью до 500 км/час не имеет подвижных контактных элементов (колес), должен левитировать на малых и строго заданных (в интервале 20...150 мм, в зависимости от типа подвеса) расстояниях от

путевой структуры, профиль движения транспортного средства в горизонтальной плоскости должен, естественно, повторять профиль путевой структуры.

Развитие магнитолевитирующего транспорта к настоящему времени сдерживается не только отсутствием в Украине необходимых узлов, блоков, элементов, но и отсутствием самой концепции системы управления. Проведенные в данном направлении исследования (преимущественно в Российской Федерации — Москве и Новочеркасске) позволили выявить специфику систем управления, сложности в реализации как в части отдельных функциональных узлов и органов, так и в осмыслении самой идеологии системы управления. Перенесенные из традиционного (колесного) железнодорожного транспорта концепции и, нередко, аппаратные построения не решают специфических проблем, возникающих при управлении экипажами, левитирующими на малой высоте над путевой структурой. Технические решения, используемые в воздушном транспорте (“автопилот”), являются избыточными с одной стороны, и неэффективными (в силу указанной выше специфики) — с другой. По сути, ставится задача создания систем управления подвижными объектами, требования к техническим и эксплуатационным параметрам которой ранее не возникали. Информация об аналогичных разработках по структуре систем управления магнитолевитирующими транспортными средствами за рубежом (в Японии, Германии и США) скрыта и носит, в основном, рекламный характер. Из отдельных публикаций в зарубежных физических и радиотехнических журналах и изданиях следует, что системы управления построены, вероятнее всего, на радиоволновых методах. Прототип такой большой ИУС, учитывающей указанную выше специфику, разработан (см. рис. 2) в Институте транспортных систем и технологий НАН Украины “Трансмаг” [7].

Существующие представления о системах управления транспортными средствами традиционных типов базируются на использовании в качестве датчиков скорости и ускорения измерительных преобразователей различного типа (реостатных, емкостных, тепловых, световых, ионизационных, тензорезистивных). Для измерения виброперемещений, виброско-

рости, различного вида ускорений, средней и мгновенной скорости движения, горизонтальных и вертикальных зазоров разработаны различающиеся по конструкции, по принципу действия, по характеру выходных сигналов самые разнообразные преобразователи. Однако, к сожалению, они не удовлетворяют в полной мере требованиям стоящей задачи ни по быстродействию, ни по точности. Например, даже усовершенствованные для конкретного

применения пьезоакселераторы (пьезотроны), как считают разработчики системы управления транспортными средствами с магнитной левитацией [8, 9], не могут быть использованы для измерения малых ускорений из-за дрейфа нуля и низкой чувствительности, для измерений постоянного ускорения, вследствие малых выходных напряжений, высокого внутреннего сопротивления, вследствие чего основные эксплуатационные показатели их невысоки.

К КОНТРОЛЛЕРАМ НИЖНЕГО УРОВНЯ ИЛИ ЛОКАЛЬНЫМ СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ, УСТРОЙСТВАМ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ, ПУЛЬТАМ УПРАВЛЕНИЯ, ПЕРЕДАТЧИКАМ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, КОММУТАТОРАМ, ДУБИРУЮЩИМ СИСТЕМАМ СИСТЕМАМ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

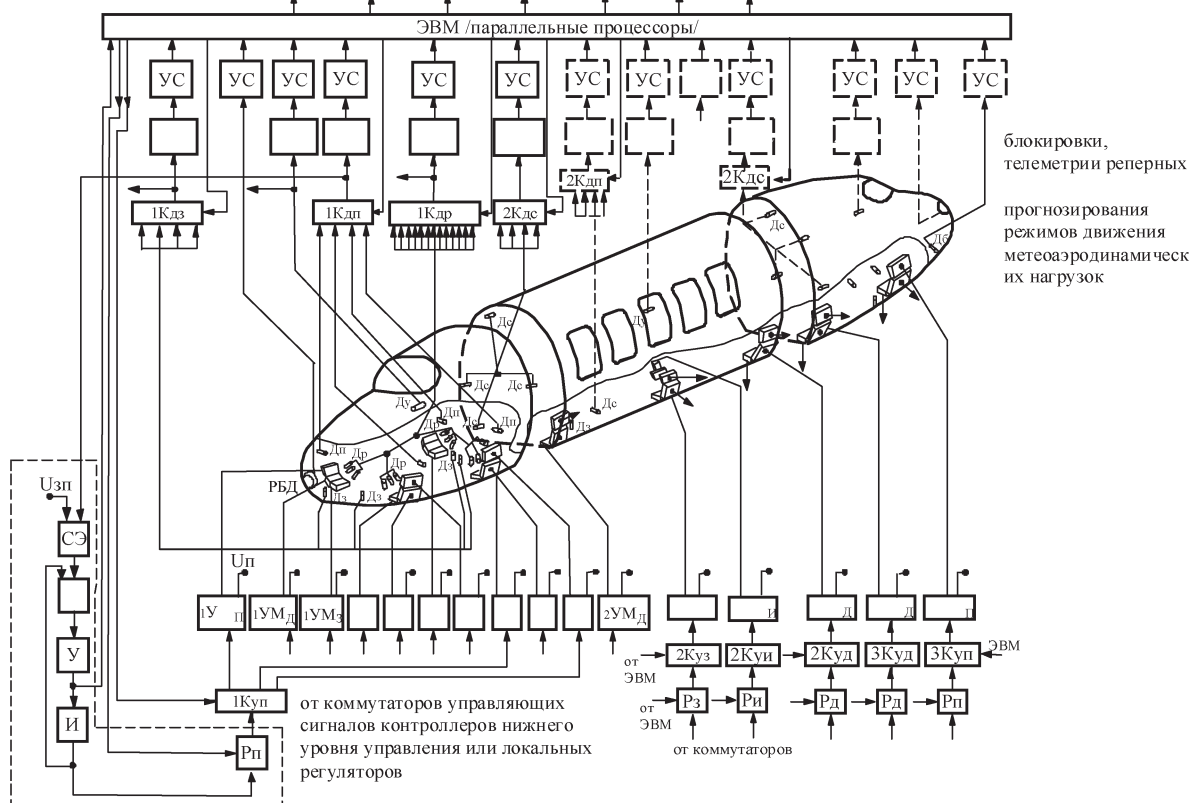


Рис. 2. Функциональная схема ИУС магнитолевитирующего экипажа

Кроме того, элементы и узлы системы управления должны быть устойчивы к воздействию переменных электрических и магнитных полей, неизбежно возникающих в зазоре между транспортным средством и активной путевой структурой, к прогибам путевой структуры, не вносить дополнительных погрешностей и включать технические решения, обеспечивающие устойчивость основных узлов и блоков к механическим и температурным нагрузкам. Поэтому, создание интегрированной системы контроля и управления движением транспортных средств на магнитном подвесе с использова-

нием традиционных подходов выглядит проблематичным.

Создание унифицированной радиоволновой системы на однородной элементной базе, основанной на однотипных физических явлениях, для контроля широкого спектра параметров быстропротекающих процессов позволило бы сократить себестоимость ее производства, номенклатуру комплектующих элементов, снизить затраты на эксплуатацию, увеличить надежность. Аналогичные соображения относятся к другим системам управления, действующим в масштабе реального времени, в частности к системам управления рас-

пределенными энергосистемами, диагностико-терапевтическими комплексами и т. п.

Действительно, такие же быстропротекающие процессы происходят при информационном обмене в живых организмах. Установлено [10], что клетки живых организмов генерируют когерентные акустоэлектрические колебания СВЧ-диапазона, которые используются в организме как сигналы управления его функционированием. Ощутимого терапевтического влияния внешних СВЧ-излучений на организм на определенных частотах удается достичь, если научиться имитировать сигналы управления, генерируемые в целях сохранения гомеостаза самим организмом [10, 11]. Методологический подход к построению таких диагностико-терапевтических ИУС, действующих в масштабе реального времени, разработан нами в работах [12, 13].

Такой инструментарий необходим разработчикам БС управления, которые, как правило, представляют собой человеко-машинные системы, надежность функционирования которых во многом определяется человеческим фактором [14, 15]. В этом смысле подсистемы автоматизированной диагностики и коррекции функционального состояния персонала сверхскоростных систем управления следует считать неотъемлемой частью последних [16].

Из принципов работы многоуровневых быстродействующих систем непосредственно следуют критерии построения информационно-измерительных систем для мониторинга их оперативных параметров, а также критерии построения их систем управления. Среди них главные — это обеспечение надежности и устойчивости работы, быстродействие, энергопрочность и помехоустойчивость:

- процессы в ИУС должны быть безынерционными (10^{-12} — 10^{-13} с), что может быть достигнуто за счет применения устройств на арсениде галлия (GaAs);

- устройства должны быть энергопрочными, следовательно, логично использовать процессы не в *p-n* переходе, а процессы, происходящие во всем объеме управляющего полупроводникового элемента;

- системы должны обладать встроенными средствами для отстройки от помеховых сигналов [17].

Назревшая потребность в разработке метода синтеза унифицированных больших систем

управления позволяет сформулировать цель настоящего исследования: разработать физические основы построения высокопроизводительных реконфигурируемых информационно-управляющих систем для применений в различных отраслях промышленности.

Управляющее воздействие СВЧ полей на электронно-волновые процессы в электрически активных полупроводниках

Поиск новых физических явлений, позволяющих значительно увеличить функциональные возможности единицы объема электронного устройства, составляет одно из основных направлений современной электроники твердого тела. Как выяснилось в последние годы, проблема создания многофункциональных электронных узлов не может быть решена только путем увеличения числа элементов и повышения степени их интеграции. Традиционное направление классической схемотехники вплотную столкнулось с проблемой “возрастающих количеств” [18]. Поэтому исследования, направленные на разработку функциональных интегральных узлов, работа которых основывалась бы не на использовании простых физических явлений в сложных сочетаниях элементов, а на применении сложных электронных эффектов в одном элементе, приобрели особую актуальность. Одним из возможных путей реализации функциональных элементов является широкое использование разнообразных физических явлений, наблюдаемых в нелинейных электрических цепях в непрерывных средах (в системах с распределенными параметрами). Так, множество дискретных компонентов сложного радиоэлектронного устройства может быть заменено элементом, выполняющим функции такого множества. Эти физические предпосылки положены в основу нового интенсивно развивающегося направления микроэлектроники — функциональных СВЧ устройств [18,19].

Диоды с междолинным переносом электронов (МЭП-диоды) следует отнести к наиболее перспективным многофункциональным приборам СВЧ электроники, поскольку эти радиокомпоненты способны отвечать перечисленным выше требованиям к системам управления. МЭП-диоды, или диоды Ганна (ДГ) отвечают требованию быстродействия, так как

электронные процессы в них практически безынерционны (время релаксации энергии горячих электронов $\tau_E \sim 6 \cdot 10^{-13}$ с) [20]), а также принципам надежности и энергопрочности, поскольку эти устройства не содержат *p-n* переходов [21].

Конструктивно эти приборы представляют собой слой однородно легированного материала, заключенный между двумя омическими контактами. В основе работы МЭП-диодов лежит явление уменьшения средней дрейфовой скорости электронов за счет резкого возрастания их эффективной массы в достаточно сильных электрических полях [21-23], что приводит к установлению в этих структурах отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) в СВЧ-диапазоне.

Как было установлено многочисленными исследованиями, в однородном бесконечно протяженном образце с N-ОДП флуктуации объемного заряда приводят к появлению семи видов устойчивых неоднородных распределений электрического поля: волны поля малой амплитуды, монополярные слои сильного и слабого поля, дипольные треугольные домены сильного и слабого поля, дипольные трапециевидные домены сильного и слабого поля [22, 24, 25]. В реальных образцах с омическими контактами и флуктуациями легирования возможны, кроме упомянутых, еще два типа статических неоднородных распределений электрического поля: катодные и анодные домены [26, 27].

Все перечисленные типы устойчивых пространственно неоднородных состояний в среде с ОДП имеют различные характерные времена и размеры, поэтому в зависимости от кинетических параметров материала, геометрических размеров образца и условий эксперимента возможны их трансформации и различные комбинации. При этом существенным образом изменяется и характеристика “на клеммах” образца, что позволяет говорить о перспективности указанных эффектов для создания элементов функциональной СВЧ электроники.

Управляющее воздействие высокочастотного напряжения на образец, расположенный в контуре, существенным образом изменяет и усложняет картину электрической неустойчивости. В частности, оказывается возможным реализовать режим, при котором частотный предел определяется не пролетной длиной, а

свойствами колебательной системы или характеристиками входного сигнала. К сожалению, общего и достаточно простого математического подхода, позволяющего уяснить переход одного режима работы в другой, их связь и способы реализации, пока не создано. Исчерпывающие исследования выполнены либо для практически стабильного домена, либо для режима ограниченного накопления объемного заряда.

При этом из рассмотрения выпадает вопрос о возможности самовозбуждения и существования автоколебаний при асинхронном соотношении их частоты с пролетной, когда наличие большой начальной амплитуды нельзя объяснить пассивной фильтрацией спектра пролетных колебаний [28]. Отмеченные пробелы теории особенно заметны при анализе режима формирующегося домена автогенераторов на МЭП-диолах, для которых характерна близость периода автоколебаний и времени переходных процессов домена. Особенностью этого режима, ценной для практики, является возможность достижения высокого КПД при перестройке частоты генерации в широких пределах.

В таком режиме гашение домена гармоническим напряжением (см. рис. 3) достигается специальным подбором соотношений трех временных параметров: τ_ϕ — времени формирования домена в диоде, t_d — времени дрейфа домена в образце длиной L от катода к аноду и T_0 — периода устанавливаемых или генерируемых колебаний [22]. Употребленные на рисунке обозначения: U_t , I_t — пороговые значения напряжения и тока междолинного перехода, U_0 — постоянное напряжение на диоде, U_m — амплитуда СВЧ-напряжения на полупроводниковой структуре, U_a , I_a — напряжение и ток исчезновения домена.

В квазистатическом приближении получены оценочные решения для избыточного напряжения на домене U_d при гашении домена гармоническим напряжением [29]:

$$U_d(t) = U_{d_0}, \quad t_m \leq t < t_m + \Delta t,$$

$$U_d(t) = U_{d_0} \exp \left[- \int_{t_m + \Delta t}^t \frac{dt'}{\tau(U_0 + R \cos \omega t')} \right],$$

$$t \geq t_m + \Delta t,$$

где U_{d_0} — напряжение на домене в начале расщепления ($t=0$), t_m — момент пересечения полным напряжением на диоде порога гашения, τ — постоянная времени, зависящая от

параметров образца и приложенного напряжения, U_0 — постоянное напряжение на диоде, R и ω — амплитуда и частота автоколебаний (в терминах обозначений [29]).

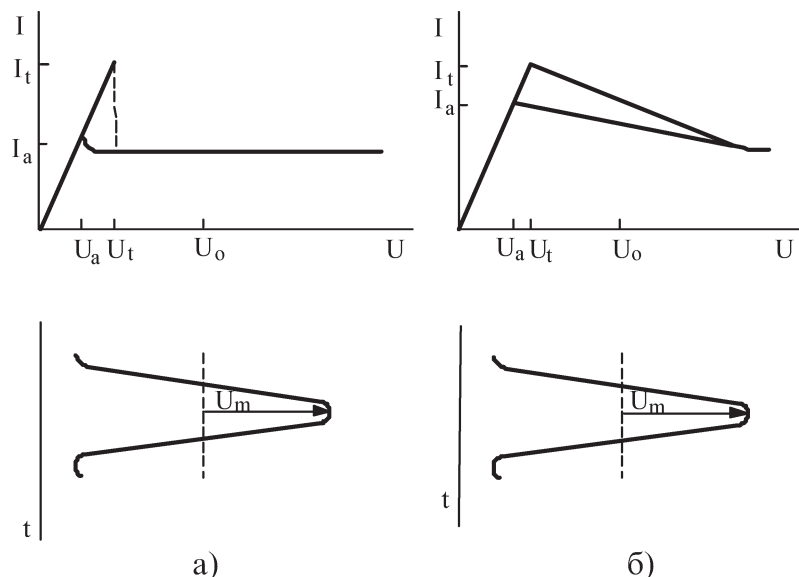


Рис. 3. ВАХ и действующее напряжение на диоде со стабильным (а) и формирующимся (б) доменами

Восполнить указанный пробел и научиться в рамках единого подхода учитывать взаимодействие СВЧ излучения с полупроводниковыми структурами (как стабилизированными по отношению к флуктуациям объемного заряда, так и работающими в режиме формирующегося домена, адекватной реальной физической ситуации) — значит решить основную задачу на пути к разработке физических принципов построения микроволновых информационно-управляющих систем (ИУС) на электрически активных полупроводниках. Решению этой задачи и посвящена данная работа.

Преобразование электрических неустойчивостей под влиянием микроволнового излучения

Эффект междолинного электронного переноса в многодолинных полупроводниках [21, 22], заключающийся в контролируемом электрическим полем переходе электронов из минимума зоны проводимости с высокой подвижностью $\{000\}$ в отстоящие выше по энергии долины с низкой подвижностью $\{100\}$, приводит к появлению падающего участка на зависимости средней дрейфовой скорости

электронов v от напряженности электрического поля E и к возникновению в объеме полупроводника отрицательной дифференциальной проводимости. Поскольку дифференциальная проводимость σ_d характеризует связь между приращениями амплитуд дрейфового тока δj и электрического поля δE ($\delta j = \sigma_d \delta E$), то при ее отрицательном значении средняя мощность, затрачиваемая волной возмущения в полупроводниковой плазме на возбуждение дрейфовых потоков пространственного заряда, также отрицательна. Следовательно, если положительные потери волн, связанные с другими возмущениями, не превышают выигрыша в энергии за счет дрейфовых токов, то эти волны в среде с ОДП будут нарастать, вызывая токовые неустойчивости [23].

С математической точки зрения задача о поведении динамической системы с ОДП сводится к решению системы описывающих ее уравнений:

$$\text{уравнения непрерывности } q \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla j = 0;$$

$$\text{уравнения Пуассона } \nabla E = \frac{q(n - n_0)}{\epsilon_0 \epsilon},$$

и уравнения полного тока

$$\frac{I}{S} = qnv(E) - q\nabla(Dn) + \varepsilon_0\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

(здесь q — электрический заряд электрона, n — концентрация электронов, S — площадь поперечного сечения полупроводника, D — коэффициент диффузии электронов, ε — диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость).

При использовании модели локальной полевой аппроксимации [21] в одномерном случае и пренебрежении термотоком, обусловленным градиентом электрического поля, удастся получить дисперсионное уравнение [30]

$$\omega = kv + i \left(\frac{qn_0 \frac{dv}{dE} + Dk^2}{\varepsilon_0\varepsilon} \right), \text{ являющееся услови-$$

ем разрешимости исходной системы уравнений и связывающее частоту ω с волновым вектором k . Из этого дисперсионного уравнения следует, что возмущения пространственного заряда и электрического поля сносятся с дрейфовой скоростью v и одновременно нарастают или затухают во времени в зависимости от знака $\text{Im}\omega$, причем для возникновения неустойчивости ($\text{Im}\omega < 0$) необходимо, чтобы

величина $\mu_d = \frac{dv}{dE}$, отрицательная при электрических полях, превышающих пороговое поле междолинного переноса, имела достаточно большое значение.

Для выяснения характера неустойчивости в неограниченной системе, описываемой указанным дисперсионным уравнением, можно воспользоваться результатами работы [31], из которых следует, что тип неустойчивости (абсолютная или конвективная) определяется положением точки ветвления функции $k(\omega)$ на комплексной плоскости ω , причем для реализации абсолютной неустойчивости необходимо, чтобы точка ветвления ω_0 (с мнимой частью $\text{Im}\omega_0 < 0$) лежала между кривой, соответствующей как минимум одному из корней дисперсионного уравнения ω при изменении $\text{Re}k$ от $-\infty$ до $+\infty$ ($\text{Im}k = 0$), и вещественной осью ω . Если же в нижней полуплоскости ω нет точек ветвления функции $k(\omega)$, то неустойчивость будет конвективной.

Определяя положение точки ветвления и

кривой, соответствующей хотя бы одному из решений исследуемого дисперсионного уравнения, находим, что система будет конвективно неустойчива при выполнении условия $-\frac{v^2}{4D} < \omega_c < 0$ и абсолютно неустойчива при $\omega_c < -\frac{v^2}{4D} < 0$ (здесь ω_c — угловая частота диэлектрической релаксации).

Для решения такой задачи, но уже по отношению к образцам ограниченных размеров, требуется задание начальных и граничных условий.

В реальных устройствах с ОДП, в которых могут возникать неустойчивости, наличие границ должно оказывать существенное влияние на характер этих неустойчивостей, поскольку возможно образование отраженных волн, устанавливающих внутреннюю обратную связь между входом и выходом устройства. При определенной величине связи тип неустойчивости может измениться.

Можно показать, что для контактов с ограниченной инжекцией носителей заряда, то есть, при выполнении граничных условий $n(0,t) = n_K$, $n(L,t) = n_A$ поведение электрического поля во времени в таких реальных образцах описывается выражением [28]:

$$E_1(x, \omega) = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon} \int_0^x n'(x', \omega) dx' + E_{10}$$

Постоянная интегрирования E_{10} определяется из уравнения Кирхгофа $\int_0^L E dx + IZ_H = 0$ при заданных граничных условиях следующим образом:

$$E_{10} = -\frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon} \frac{\int_0^L dx' \int_0^x (n(x'', \omega) dx'' - qn_K v_0)}{\left(\frac{1}{Z_H} + \frac{1}{R_d} + i\omega C \right)},$$

где IZ_H — падение напряжения на внешней нагрузке Z_H , $R_d = S \frac{\sigma_d}{L}$; $C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{L}$, а ток I определяется по формуле

$$I = S(\sigma_d E_{10} + i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_{10} + qn_K v_0).$$

Отсюда следует, что электрическое поле имеет дополнительный полюс при

$\omega = \frac{i}{C} \left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{Z_H} \right)$, так что при выполнении условия $\frac{1}{R_d} < -\frac{1}{Z_H}$ система будет электрически неустойчивой.

При выполнении противоположного условия $-\frac{1}{Z_H} < \frac{1}{R_d} < 0$ система стабильна и, как будет показано ниже, может иметь отрицательную проводимость. Для подтверждения этого определим импеданс схемы при выбранных граничных условиях и нулевых начальных условиях.

Импеданс рассматриваемой схемы [28]

$$Z(\omega) = \frac{Z_H(1/R_d + 1/Z_H + i\omega C)}{1/R_d + i\omega C}$$

равен сумме импедансов нагрузки Z_H и образца $Z_d(\omega)$:

$$Z_d(\omega) = \frac{1/R_d - i\omega C}{(1/R_d)^2 + \omega^2 C^2}.$$

Из последнего выражения видно, что при $\sigma_d < 0$ образец вносит во внешнюю схему отрицательную дифференциальную проводимость и может, в частности, использоваться для усиления микроволновой мощности.

Таким образом, в случае контактов с ограниченной инжекцией электронов, которые наиболее часто используются в реальных полупроводниковых СВЧ-устройствах, режим устойчивой отрицательной проводимости может быть реализован при выполнении таких условий:

$$-\varepsilon_0 \varepsilon \left(\frac{v^2}{4D} + \frac{\pi^2 S_0^2 D}{L^2} \right) < \sigma_d < 0;$$

$$\text{и } -\frac{L}{S} \frac{1}{Z_H} < \sigma_d < 0,$$

причем первое условие определяется параметрами образца с отрицательной дифференциальной проводимостью, а второе условие внешней схемой.

В случае антизапорных контактов (с нулевыми по полю граничными условиями), другими словами, омических контактов, когда $E_1(0, t) = E_2(L, t) = 0$, из уравнения $e^{-\alpha} + 1 - \alpha = 0$, где $\alpha = ikL$ [30], определяющего нули импеданса системы, получаем, что абсолютная неустойчивость возникает при $\text{Im} \omega_c < 0$, то есть при выполнении условия

$\omega_c + 2,09 \frac{v}{L} < 0$ (действительная часть корней указанного уравнения $\alpha'_c = -2,09$ [30]). Это условие можно записать в удобном для анализа

$$\text{виде: } nl > \frac{2,09 \varepsilon_0 \varepsilon v}{q \left| \frac{dv}{dE} \right|}.$$

При выполнении противоположного условия осуществляется режим конвективной неустойчивости, и распределение поля в образце с ОДП остается пространственно однородным.

Для выяснения функциональных возможностей таких структур, обладающих устойчивой отрицательной динамической ВЧ-проводимостью, с целью их эффективного использования в приборных комплексах нами проведен анализ процессов взаимодействия внешнего микроволнового излучения с указанными структурами. При этом наиболее интересные эффекты проявляются при взаимодействии электромагнитного излучения со стабилизированными МЭП-структурами вблизи порога неустойчивости [32]. Теоретический анализ [30, 33] показал, что для развития электрической неустойчивости, приводящей к формированию доменов, необходимо, чтобы кривая зависимости импеданса цепи $Z(\omega) = R(\omega) + iX(\omega)$ от частоты ω (кривая Найквиста), охватывала начало координат (кривая 1 на рис. 4), где $R(\omega)$, $iX(\omega)$ — реальная и мнимая части импеданса, соответственно.

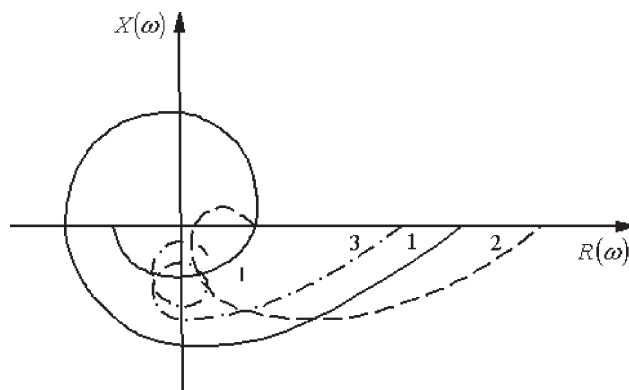


Рис. 4. Качественные диаграммы полного сопротивления: 1 — режим генерации; 2 — режим стабилизации диода активной нагрузкой; 3 — режим стабилизации диода реактивным сопротивлением

Это значит, что если к МЭП-диоду подключить такую комплексную нагрузку, чтобы сместить кривую вдоль одной или обеих осей, и расположить ее вблизи положения неустойчи-

вости, то малые возмущения могут изменить проводимость образца таким образом, чтобы условие устойчивости не выполнялось, или же, напротив, подобрать такой режим изменением напряжения на МЭП-диоде, при котором флуктуационная неустойчивость будет сдержана внешней цепью.

Заключение

Итак, целенаправленное воздействие СВЧ-полями специальной конфигурации позволяет управлять типом неустойчивости: от абсолютной неустойчивости удается перейти к конвективной (сносовой) неустойчивости. Тогда в электрически активных полупроводниках, обладающих флуктуационной неустойчивостью, можно реализовать режимы с так называемой “стабилизированной неустойчивостью”. Это дает возможность на тех же самых полупроводниковых структурах реализовать и генераторные устройства (пролетного типа или генераторы с ограниченным накоплением объемного заряда — ОНОЗ-генераторы), и стабильные усилители различного типа, а также преобразовательные устройства, электроуправляемые аттенюаторы и т.п., что является основой надежного функционирования быстродействующих многофункциональных информационно-измерительных систем.

Полученные результаты легли в основу реализованного нами ряда быстродействующих СВЧ-устройств различного функционального назначения: преобразователь частоты типа модулятор-демодулятор, ограничитель мощности [33], фазовый модулятор [34], активный смеситель сдвига частоты миллиметрового диапазона на диодах Ганна [35], энергопрочный детектор СВЧ-излучения [36] и др.

Таким образом, всесторонне (теоретически и экспериментально) обоснован методологический подход к синтезированию реконфигурируемых быстродействующих информационно-управляющих систем, в основу которого положено использование нелинейных явлений в электрически активных полупроводниках в СВЧ полях.

Использованные источники

1. Гуд Г.Х., Маккол Р.Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. М.: Сов. радио, 1962.
2. Калашиников И.А., Степанов К.С., Чуркин А.В. Адаптивные системы сбора и передачи информации. М.: Энергия, 1975.
3. Кошевой А.А. Телеметрические комплексы летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1975.
4. Кедров И.И. // Военно-промышленный курьер. 2005. № 33 (100). С. 6.
5. Heinrich K., Kretzschmar R. Transrapid MagLev System. Darmstadt. HESTRA-Verlag. 1989.
6. Seki A., Tsuruga H., Inoue A. // Proceedings of 17th International Conference on MAGnetically LEVitated Systems and Linear Drives “MAGLEV’2002”, Swiss Federal Institute of technology. Lausanne. 2002.
7. Дзензерский В.А., Плаксин С.В., Соколовский И.И. // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2002. № 1 (7). С. 108.
8. Расчет и исследование систем автоматического управления экипажей. Отчет о НИР: Руководитель работ Ю.А.Бахвалов. Инв. № 02860038765. Новочеркасск, 1985.
9. Toshiro F., Norio K. // Quart. Reports Railway Tech. Res. Inst., 1976. V. 17. № 4. P.151.
10. Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. — М.: Радио и связь, 1991.
11. Клейман А.С., Усенко Т. А. // Тр. IV Межд. научн. — техн. конф. “Метрология и измерительная техника” 12 — 14 октября 2004. Харьков. Т. 1. С. 175.
12. Плаксин С.В., Соколовский И.И. // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. 2004. Т. 9. № 3. С. 619.
13. Plaxin S.V., Pogorelaya L.M., Rudenko I.I., Sokolovskiy S.I. // Proceedings of the Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2004. P. 827.
14. Калинин В.П. Метрополитены. — М.: Транспорт, 1988.
15. Плаксин С.В., Соколовский И.И. // Железнодорожный транспорт Украины. 2005. № 3/1 (48). С. 25.
16. Dzenzersky V.A., Kulikovich J.N., Plaxin S.V., Sokolovsky I.I. // Proceedings of 17th International

- Conference on MAGnetically LEVitated Systems and Linear Drives "MAGLEV'2002", Swiss Federal Institute of technology. Lausanne. 2002.
17. *Гаврилюк В.И., Сыченко В.Г.* // Тез. докл. II науч. — практич. конф. "Проблемы и перспективы развития транспортных систем: техника, технология, экономика и управление". Киев. 2004. Часть 1. С. 197.
 18. *Кабанов Д.А.* Функциональные устройства с распределенными параметрами. М.: Сов. Радио. 1979.
 19. *Бокринская А.А.* // Функциональная СВЧ электроника. Киев: РДЭНТП. 1983. С. 3.
 20. *Плаксин С.В.* // Вестник Днепропетровского универ. "Физика и Радиоэлектроника. 1993. Вып. 1. С. 98.
 21. *Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г.* Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. М.: Наука. 1972.
 22. *Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С.* Эффект Ганна. М.: Сов. Радио. 1975.с.
 23. *Пожела Ю.К.* Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. М.: Наука, 1977.
 24. *Владимиров В.В., Волков А.Ф., Мейлихов Е.З.* Плазма полупроводников. М.: Атомиздат. 1979.
 25. *Shaw U., Grubin N.L., Solomon P.R.* The Gunn-Hilsum effect. New York: Acad. Press. 1979.
 26. *Хауэсс М., Морган Д.* Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ. М.: Мир. 1979.
 27. *Прохоров Э.Д., Белецкий Н.И.* Полупроводниковые материалы для приборов с междолинным переносом электронов. Харьков : Харьк. ун-т. 1982.
 28. Исследование динамики процессов в электрически неравновесных средах для разработки многофункциональных систем управления и связи: Отчет о НИР / Институт технической механики ан УССР (ИТМ АН УССР), руководитель С.А. Костылев. № 80065056. Днепропетровск. 1985.
 29. *Орлов В.Б.* // Радиотехника и электроника. 1984. № 5. С. 966.
 30. *McCumber D.E., Chynoweth A.G.* //IEEE Trans. Electron devices. 1966. V. 13. N 1. P. 4.
 31. *Ахизер А.И. Половин Р.В.* Критерии нарастания волн // УФН. 1972. Т. 104. Вып. 2. С. 185.
 32. *Дзензерский В.А., Плаксин С.В., Соколовский И.И.* // Изв. Вузov — Радиоэлектроника. 2005. № 11. С. 18.
 33. *Костылев С.А., Гончаров В.В., Соколовский И.И., Челядин А.В.* Полупроводники с объемной отрицательной проводимостью в СВЧ-полях. Киев: Наукова думка, 1987.
 34. *Плаксин С.В.* // Вестник Национального университета "Львовская политехника". Серия "Радиоэлектроника и телекоммуникации". № 508. 2005. С. 216.
 35. *Плаксин С.В., Соколовский И.И.* // Радиофизика и радиоастрономия. 2005, Т. 10. № 1, С. 98.
 36. *Плаксин С.В.* // Вестник Харьковского национального университета. Серия "Радиофизика и электроника". 2004. Вып. 1. С. 3.