**Негатроника. Исторический обзор**

Николай Филинюк

В настоящее время в области электроники развивается ряд научных направлений: квантовая электроника, оптоэлектроника, акустоэлектроника, хемотроника, магнитоэлектроника, криоэлектроника и др. В последнее десятилетие сформировалось еще одно направление – «Негатроника» [1...3]. Это направление электроники связанно с теорией и практикой создания и применения негатронов – электронных приборов, имеющих в определенном режиме отрицательное значение основного дифференциального параметра (отрицательных активного сопротивления, емкости и индуктивности) [4]. В настоящее время разработаны различные виды негатронов, обобщенная классификация которых представлена на рис.1. Только полупроводниковых негатронов создано более двух десятков разновидностей (рис.2). Среди них самые мощные сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы – лавинно-пролетные диоды, самые быстродействующие ключи на лавинных транзисторах, самые мощные токовые полупроводниковые переключатели на динисторах и тиристорах. Однако развитие этого направления проходило неравномерно и, в отличие от классической транзисторной электроники, долгое время не имело систематизированной методологической и теоретической базы. И только в 1985 году [1] была дана формулировка этого научного направления. Целью данной статьи является попытка кратко рассмотреть историю развития «Негатроники».

Рис. 1. Обобщенная классификация негатронов

Возбуждение электрических колебаний с помощью отрицательных импедансов известно еще с начала ХХ века и связано с открытием Дудделем [5] «Звучащей электрической дуги». Вследствие неудобства практического использования электрической дуги в схемах генераторов она была вытеснена появившимися ламповыми генераторами.

Первые электронные лампы, вследствие несовершенства техники получения глубокого вакуума, были газонаполненными, и на их вольт-амперных характеристиках наблюдались падающие участки. На этих участках вещественный импеданс между анодом и катодом газонаполненной лампы является отрицательным [6], что в принципе позволяло использовать это их свойство для построения генераторов и усилителей электрических колебаний. Однако их большие шумы и нестабильность явились причиной незначительного интереса к ним, как к приборам, обладающим отрицательным сопротивлением.

Рис. 2. Классификация полупроводниковых негатронов

Изобретение в 1924 году электровакуумного тетрода поставило перед специалистами проблему «динатронного эффекта», в результате которого на выходной вольт-амперной характеристике тетрода наблюдается падающий участок, приводящий к росту нелинейных искажений и самовозбуждению усилителя. Этот эффект не нашел практического применения и был преодолен в 1931г. введением в электронной лампе третьей антидинатронной сетки.

Открытие падающего участка на в.а.х. полупроводникового точечного диода, сделанное 13 января 1922 году инженером Нижегородской лаборатории О.В.Лосевым, следует считать началом развития полупроводниковой негатроники [7]. Молодой ученый не только впервые получил на в.а.х. диода падающий участок, но и реализовал с использованием такого диода регенеративный приемник – кристадин. Эти результаты привлекли внимание многих специалистов мира. В США журнал "Radio News" поместил в сентябрьском номере редакционную статью под заголовком «Сенсационное изобретение». В ней говорилось: «Нет надобности доказывать, что это – революционное радио-изобретение. В скором времени мы будем говорить о схеме с тремя или шестью кристаллами, как мы говорим теперь о схеме с тремя или шестью усилительными лампами. Потребуется несколько лет для того, чтобы генерирующий кристалл усовершенствовался настолько, чтобы стать лучше вакуумной лампы, но мы предсказываем, что такое время наступит». В этом предсказании не оправдались только сроки. Именно эти первые работы О.В.Лосева следует считать началом «Эры» полупроводниковой электроники.

Электронные приборы с падающим участком на в.а.х. в дальнейшем получили наименование «негатроны» [9].

Успешное развитие электронно-вакуумных приборов отвернуло внимание специалистов от этого направления. Хотя, в результате развития электронных ламп и повышения рабочих частот, в них проявлялись эффекты, связанные с отрицательным сопротивлением. Это приводило к неконтролируемому возбуждению электронной аппаратуры и росту нелинейных искажений, и поэтому рассматривалось как паразитное явление. И только изобретение в 1932г. Д.А.Рожанским и А.Н.Арсеньевой пролетного клистрона, а в 1936...37гг. Н.Ф.Алексеевым и Д.Е.Маляровым – многорезонаторного магнетрона, явилось дальнейшим толчком развития вакуумной негатроники. В этих приборах, и позже в изобретенных лампах бегущей (ЛБВ) и обратной волны (ЛОВ), в результате взаимодействия электронов с электромагнитными полями, происходит преобразование кинетической энергии электронов в энергию электромагнитного поля и, как следствие, к появлению отрицательного сопротивления [10]. Значительный вклад в создание таких приборов принадлежит Н.Д.Девяткову, М.С.Нейману, С.Д.Гвоздоверу, В.Ф.Коваленко, М.Т.Греховой, Ю.А.Кацману, С.А.Зусманову, И.В.Лебедеву и др.

Освоение СВЧ диапазона привело к поиску новых физических эффектов и полупроводниковых приборов, обладающих отрицательным сопротивлением. Усилия прежде всего были направлены на создание полупроводниковых негатронов, обладающих отрицательным сопротивлением как можно на более высоких частотах в сверхвысокочастотном диапазоне. Началом поиска путей создания таких СВЧ-приборов было положено статьей Шокли, опубликованной в 1954 году [11]. Автор обсуждает идею двухэлектродного прибора с отрицательным сопротивлением, возникающим благодаря эффекту времени пролета. В качестве первого примера он рассматривает «диод с задержкой неосновных носителей». В предлагаемой им p+-n-p или (n+-p-n)-структуре, неосновные носители, инжектируемые из p+-n перехода, дрейфуют к другому p-n переходу, претерпевая при этом задержку, равную времени пролета. Другой прибор, предложенный Шокли, представляет собой p-n-p структуру, которая используется в режиме прокола, чтобы обеспечить ее униполярность. Эти две структуры необычайно похожи на появившиеся позднее инжекционно-пролетные диоды (ИПД).

В той же статье Шокли обсуждает возможность создания двухэлектродного прибора, представляющего собой просто однородный полупроводник, в котором под действием сильного электрического поля могут наблюдаться отклонения от закона Ома, приводящие к возникновению отрицательного дифференциального сопротивления. Отклонение от закона Ома выражается в понижении скорости носителей с увеличением напряженности поля, т.е. в появлении области отрицательной дифференциальной подвижности. Однако практической реализации эта идея не получила из-за ряда теоретических недоработок. И только в 1963г. Ганном были получены первые экспериментальные данные о существовании пролетных колебаний, связанных с этим свойством, в GaAs и InP [12]. А приборы, использующие этот эффект, получили наименование «Диоды Ганна» или «приборы на эффекте объемного отрицательного сопротивления».

Интересный двухэлектродный прибор с отрицательным сопротивлением, действующий на новом принципе – туннельный диод, был открыт в 1957г. японским физиком Эсаки [13]. На прямой ветви в.а.х. очень узкого германиевого p-n-перехода (т.е. перехода, созданного на сильнолегированном материале) был обнаружен участок отрицательного сопротивления конечной величины. Такая характеристика получается в результате полевой эмиссии (туннелирования) электронов через узкий обедненный слой. Следует заметить, что туннельный диод не оправдал ожиданий, поскольку от него не удалось получить большой выходной мощности.

В 1958г. Рид [14] предложил использовать для генерации СВЧ мощности диод с многосложной n±p-p– структурой. В этом приборе используется сочетание эффектов лавинного умножения, основанного на ударной ионизации, и времени пролета электронов. Поэтому прибор был назван IMPATT-диод (Impact Avalanche and Transit Time). Однако предложенная им специальная конструкция диода оказалась слишком сложной, ее удалось воплотить в жизнь только в 1964г.

В СССР эти приборы получили наименование «лавинно-пролетные диоды» (ЛПД) и были открыты А.С.Тагером и его сотрудниками в 1959г. [15]. За рубежом первое сообщение о практической реализации ЛПД было опубликовано в 1965 году [16].

Дальнейшим развитием ЛПД является ТРАПАТТ-диод (Траpped Plasma Avalanche-and-Transit Time, что означает «лавинно-пролетный диод с захватом плазмы»). Для реализации ТРАПАТТ-режима, открытого в 1966г. [17], необходимо весьма сложное взаимодействие между прибором и СВЧ схемой. Например ТРАПАТТ-усилитель требует настройки по гармоникам и субгармоникам, а также использования ЛПД-режима для запуска. Несмотря на сложность самого прибора и соответствующей схемы, ТРАПАТТ-диоды играют ведущую роль в фазированных антенных решетках (ФАР), поскольку обеспечивают возможность получения высокой импульсной мощности на СВЧ (>100 Вт), большего коэффициента заполнения (1...20%), высокого к.п.д. (>25%) и ширины полосы пропускания в усилителях не менее 15%. Однако этим приборам присущи и некоторые недостатки:

процессу ударной ионизации свойственны значительные шумы, поэтому усилители и генераторы на их основе будут также иметь большие шумы;

процесс ударной ионизации требует большей мощности для получения значительных электрических полей.

В 1971г. впервые была получена генерация в СВЧ диапазоне с помощью инжекционно-пролетных диодов (ИПД) [18], теоретические основы работы которого были обоснованы еще в 1954 году Шокли [11]. В ряде публикаций эти диоды получили наименование «БАРИТТ-диоды» (Barrier Injection Transit Time Diodes). Обладая, как и ЛПД, динамическим отрицательным сопротивлением в диапазоне СВЧ, в них не используется режим лавинного умножения носителей и, следовательно, отсутствуют недостатки, присущие ЛПД.

Все выше рассмотренные диоды с отрицательным сопротивлением предназначены для работы в диапазоне СВЧ и способны работать при относительно небольших значениях мощности сигнала и рабочих токах.

На низких частотах большое распространение получили четырехслойные полупроводниковые структуры типа p-n-p-n и их различные модификации, обладающие отрицательным сопротивлением [19]. В основе их работы лежит тиристорный эффект, обусловленный лавинным умножением носителей в закрытом среднем p-n переходе. Наиболее широкое применение получили двухэлектродные p-n-p-n (динисторы) и трехэлектродные (тиристоры) структуры. Кроме того известны тиристоры с управлением по двум входным цепям (тетристоры) и тиристоры с чувствительным и не чувствительным электродом. Наиболее систематические исследования таких тиристорных негатронов проведены С.А.Гаряиновым и Н.Д.Абергаузом. Эти приборы могут работать в усилительном, генераторном и ключевом режимах. Для них характерна большая экономичность по питанию при работе в ключевом режиме, способность коммутировать сигналы большой мощности. Таким образом, теоретически они являются многофункциональными приборами, с помощью которых можно осуществлять широкую унификацию радиоэлектронных устройств. Однако практическая область их применения ограничивается в основном устройствами импульсной техники, что объясняется рядом характерных для них недостатков. К ним относятся: низкая температурная стабильность, повышенная неустойчивость коэффициента преобразования устройств к изменению отрицательного сопротивления, низкая экономичность по питанию при работе в линейном режиме, высокие питающие напряжения и малый частотный диапазон.

Исследование эффекта лавинного умножения в коллекторном переходе биполярного транзистора привело к созданию лавинного транзистора, на в.а.х. которого имеется участок отрицательного сопротивления [20]. Теоретические исследования таких негатронов и импульсных устройств на их основе, проведенные В.П.Дьяконовым [21], показали возможность формирования импульсов с временем нарастания 0,1...1нс и амплитудой до 15В и более на сопротивлении нагрузки в 750Ом. Некоторые транзисторы позволяют при меньшей амплитуде генерировать импульсы с частотой повторения до 1ГГц, другие, при значительно меньших частотах повторения, способны формировать импульсы с амплитудой по напряжению до 100В на нагрузке 50Ом или импульсы с амплитудой по току до 50А на сопротивлении нагрузки в 0,5...1Ом. Наличие между эмиттером и коллектором лавинного транзистора индуктивного импеданса с отрицательной вещественной составляющей стало предпосылкой использования его в качестве высокодобротного полупроводникового аналога индуктивности [22]. Однако большие шумы таких негатронов, обусловленные лавинным эффектом, и низкая температурная стабильность сделали применение лавинных транзисторов в таком качестве бесперспективным.

Технологические методы создания планарных полупроводниковых приборов достигли высокого совершенства. Поэтому негатроны на p-n переходах могут обладать относительно высокой надежностью и воспроизводимостью. Однако процесс их изготовления трудоемкий, поскольку требует проведения от двух до четырех высокотемпературных процессов окисления и диффузии, и соответствующего количества процессов фотолитографии. С этой точки зрения более интересны аморфные и поликристаллические полупроводниковые пленки, в которых наряду с ОС (отрицательным сопротивлением) существует и переключение с памятью. При приложении к пленке определенного порогового напряжения, она скачком переходит в низкоомное состояние и сохраняет его даже в случае отключения питания. Первое сообщение в 1969г. о наблюдении ОС в стеклообразных полупроводниках дало толчок к созданию различных негатронов на основе халькогенидных материалов [23]. Однако до сих пор физические механизмы возникновения ОС в таких полупроводниках окончательно не изучены. Исследования в этом направлении активно ведутся в Азербайджанской научной школе под руководством профессора Ф.Д.Касимова [24], где в 1991 году была проведена первая Всесоюзная научно-техническая конференция по негатронике [2].

Общим существенным недостатком всех выше рассмотренных полупроводниковых негатронов является зависимость их отрицательного сопротивления от физических свойств полупроводниковых кристаллов и физических процессов в них. А стремление реализовать 100% внутреннюю положительную обратную связь внутри кристалла накладывает жесткие требования к технологии изготовления таких негатронов, затрудняет производство идентичных приборов и дальнейшее их применение. Эти недостатки при создании транзисторных негатронов были частично преодолены путем реализации комбинированной 100% положительной обратной связи: частично внутренней, за счет временной задержки неосновных носителей в базе транзистора; частично, за счет введения цепи внешней обратной связи. Началом этого направления, видимо, следует считать 1956г., когда Ямагучи (J.Jamaguchi) исследовал негатрон на транзисторе с общим коллектором и индуктивной цепью обратной связи между базой и коллектором [25]. В дальнейшем были исследованы различные модификации такого негатрона, получившего наименование «индуктивный транзистор», т. к. он оказался перспективным в качестве полупроводникового аналога индуктивности. Следует отметить успешное применение этого негатрона в различных аналоговых СВЧ устройствах (активных фильтрах, генераторах, преобразователях частоты, мультиплексорах, активных антеннах и др.). Основы проектирования таких устройств были заложены в работах Дилла (Н.Dill) [22], Адамса и Хо (D.K.Adams, R.Y.С.Ho) [26] и др. Систематизация и дальнейшее развитие этого научного направления сделано автором этой статьи в работах [24, 27], где предложено рассматривать транзистор как обобщенный преобразователь иммитанса, и обоснован физический механизм возникновения динамического отрицательного сопротивления на его клеммах.

Другим направлением негатроники, направленным на преодоление недостатков однокристальных полупроводниковых негатронов, является создание аналогов негатронов на базе различных схемотехнических комбинаций активных приборов. Видимо, одной из первых работ в этом направлении следует считать монографию С.А.Гаряинова и И.Д.Абергауза [19], опубликованную в 1966г. Дальнейшее развитие это направление получило в широко известных работах Х.Стедлера [28], Л.Н.Степановой с соавторами [29], О.Н.Негоденко [30], Нильсона и Уильсона и др. Развитая в работах этих авторов теория синтеза аналогов статических негатронов N- и S-типа позволила создать большое количество различных схемотехнических решений для широкого класса как аналоговых, так и ключевых электронных устройств различного функционального назначения. Их можно разделить на три группы. В первой группе объединяются транзисторные аналоги, состоящие из транзисторов одной структуры. Вторую группу составляют аналоги, выполненные на транзисторах разной структуры, но не составляющих эквивалент p-n-p-n-структуры. Третья группа состоит из транзисторных эквивалентов p-n-p-n-структуры. Использование в таких схемах перекрестных связей ограничивает их применение частотами до 1ГГц.

Приведенный выше исторический экскурс далеко не всеобъемлемо охватывает пути развития негатроники и роль ученых разных стран в ее развитии.

В заключении нельзя не обратить внимание читателя на ряд фундаментальных обобщающих работ в области негатроники.

Прежде всего это монография С.А.Гаряинова и И.Д.Абергауза «Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением» (М.: Энергия, 1974) в которой сформулирован ряд основополагающих положений, касающийся статических R-негатронов. Основы теории вакуумных негатронов обобщены И.В.Лебедевым в книге «Техника и приборы СВЧ» (т.2., М.: Высшая школа, 1972). Теория и применение лавинных транзисторов детально рассмотрены в монографии В.П.Дьяконова «Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах» (М.: Советское радио, 1975). В работе «Отрицательные сопротивления в электронных схемах» (М.: Сов. радио, 1973) Ф.Бенингом анализируются обобщенные свойства не только R-, но и L-, C-негатронов и их схемотехническая реализация. Физика работы и вопросы применения полупроводниковых статических и динамических R-негатронов рассматриваются в монографии «Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ», (М.: Мир, 1979) под редакцией М.Хауэса и Д.Моргана. В монографии А.С.Тагера и В.М.Вальд-Перлова «Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ» (М.: Советское радио, 1968), дается детальный анализ физики работы ЛПД и СВЧ устройств на их основе. Вопросы практического использования статических R-негатронов в информационных устройствах обобщены В.И.Стафеевым, К.Ф.Комаровских и Г.И.Фурсиным в монографии «Нейристорные и другие функциональные схемы с объемной связью» (М.: Радио и связь, 1981). Общая теория динамических транзисторных негатронов и активных СВЧ фильтров на их основе рассмотрена в монографии Н.А.Филинюка «Активные СВЧ фильтры на транзисторах» (М.: Радио и связь, 1987). Широкому кругу вопросов теории анализа и синтеза негатронов и их схемотехнических аналогов посвящена монография коллектива авторов из России, Украины и Азербайджана «Негатроника» (под ред. Л.Н.Степановой, Новосибирск: Наука, 1995). В монографиях Н.А.Филинюка «Аналіз і синтез інформаційних пристроїв на базі потенційно-нестійких узагальнених перетворювачів імітанса» (Вінниця, ВДТУ, 1998) и «Физико-технические и схемотехнические особенности проектирования кремниевых микроэлектронных преобразователей на основе негатронов» (Баку, ЭЛМ, 1999), авторов Ф.Д.Касимова, Ф.Г.Агаева и Н.А.Филинюка, обобщены результаты теоретических исследований кристаллических и полупроводниковых негатронов и электронных устройств на их основе.

В настоящее время негатроника сформировалась как научное направление, результаты исследований в котором получили широкое практическое применение. Организационно это научное направление объединило ученых стран СНГ в международном координационном центре по проблеме «Негатроника», организованном в Винницком государственном техническом университете в 1986 году, в состав которого входят такие известные ученые, как профессора С.А.Гаряинов, В.П.Дьяконов, Л.Н.Степанова, Ф.Д.Касимов, Н.А.Филинюк, Л.И.Биберман и др.

Автор понимает, что сделанный им исторический обзор, в связи со сложностью поставленной задачи, далеко не полный. Поэтому будет благодарен всем, кто внесет свои пожелания или критические замечания по теме статьи.

**Список литературы**

ФилинюкН.А. Перспективы развития динамической негатроники. // В кн. «Приборы с отрицательным сопротивлением». Тез. Докладов всесоюзного научно-технического семинара. – М.: ВДНХ, 1985. – С. 6...7.

ФилинюкН.А. Негатроника – достижения и перспективы // Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе». – Баку, 15...17 октября, 1991, С. 11...17.

СерьезновА.Н., СтепановаЛ.Н., ФилинюкН.А. и др. Негатроника. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 315 с.

БенингФ. Отрицательные сопротивления в электронных схемах. – М.: Сов. радио, 1975. – 288 с.

DuddelW.: Electrician, 1900, 46, р. 219, 310.

КапцовН.А. Электрические явления в газах и вакууме. – М.: Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1950.

ЛосевО.В. Детектор генератор и детектор усилитель // Телефония и телеграфия без проводов. – 1921. – №3.

Бонч-БруевичМ.А. // Телефония и телеграфия без проводов. – 1928. – №50.

БиберманЛ.И. Широкодиапазонные генераторы на негатронах. – М.: Радио и связь, 1982. – 89 с.

ЛебедевИ.В. Техника и приборы СВЧ. Т. II. Электровакуумные приборы СВЧ. Под ред. Н.Д.Девяткова М., «Высшая школа», 1972.

ShockleyW. Negative resistance arising from transit time in semiconducting diodes.-Bell System tech.J.,1954, v.33, p. 799...826.

GunnJ.B. Microwave oscillations of current in III-V semiconductors.- Solid state commun., 1963, #1, p. 88...91.

EsakiL. New phenomenon in narrow germanium p-n junctions.-Physical Review, 1958, V. 109, #2, p. 603...604.

ReadW.T. A proposed high frequency negative resistance diode. – Bell system tech. J., 1958, #37, p. 401.

ТагерА.С., МельниковА.И., ЦебковА.М., КобельниковГ.П. Явление генерации радиоволн полупроводниковым диодом. Диплом на открытие №24, приоритет от 27.10.1959, зарегистр. 17.03.1964.

JohnstonR.L., DeLoachB.C., CohenB.G. A silicon diode microwave oscillator. – Bell System Tech. J., 1965, #4, p. 569...372.

PragerH.J., Chang K.K.N., Weisbrods. – Microwave oscillator. proc. IEEE, 1967, #55, p. 586.

ColemanD.I., SzeS.M. A low-noise metal-semiconductor-metal (MSM) microwave oscillator.-Bell System Tech.3.,1971, v.50, p. 1695...1699.

ГаряиновС.А., АбергаузИ.Д. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. – М.: Энергия, 1970.

KyroyanagiN., WatanabeM. High speed pulse Current using Punch-through Avalanche Transistors.-Rew. of the Electrical Commun. Lab., 1966, V.14, #1...2, p. 97.

ДьяконовВ.П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах – М.: Сов. радио, 1973. – 208 с.

DillH. Inductive semiconductor elements and their application in bandpass amplifiers. – RE Transactions on military electronics. 1961, V. MIL-5, #3 p. 239...250.

КоломиецБ.Т., ЛебедевЭ.В., ТаксимиИ.А. Основные параметры переключателей на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // ФТП. – 1965. – №5, с. 731...735.

КасимовФ.Д., АгаевФ.Г., ФилинюкН.А. Физико-технические особенности проектирования кремниевых микроэлектронных преобразователей на основе негатронов / Под редакцией доктора физико-математических наук, профессора Ф.Д.Касимова – Баку, 1999. – 234 с.

JamaguchiJ. On the inductive reactance and negative resistance the transistor. – Journal Physical Society of Japan, 1956, V.11, p. 717...718.

AdamsD.K., HoR.Y.C. Filtering, frequency multiplexing and other microwave application with inverted-common-collector transistor circuits. – Internat. microwave simp., Dallas, may 1969, p. 14...20.

ФилинюкН.А. Активные СВЧ фильтры на транзисторах. – М.: Радио и связь, 1987. – 112 с.

СтедлэрХ. Использование транзистора для получения аналога стабилитрона с нулевым динамическим сопротивлением. // Электроника (США). – 1969. – №7. – С. 30...31.

АрефьевА.А., БаскановЕ.Н., СтепановаЛ.Н. Радиотехнические устройства на транзисторных эквивалентах p-n-p-n-структуры. – М.: Радио и связь, 1982. – 104 с.

НегоденкоО.Н., ЛипкоС.И., МирошниченкоС.П. Каскодные аналоги негатронов. // В кн. Полупроводниковая электроника в технике связи. Под ред. И.Ф. Николаевского. – М.: Радио и связь, 1986, вып. 26, С. 29...33.

Ранее опубликовано:

«Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – 1999. – №3. – С.38...43.

УДК 621.396.6: 621.049.774.011.3