

К. т. н. Ю. Н. ЛАВРИЧ, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, В. Я. КРЫСЬ, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ,
к. ф.-м. н. И. И. СОКОЛОВСКИЙ

Украина, г. Днепропетровск, Институт транспортных систем и технологий НАНУ «Трансмаг»
E-mail: plm@westa-inter-com

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ СВЧ-МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Разработан быстродействующий двухканальный переключатель СВЧ-мощности в трехсантиметровом диапазоне длин волн с использованием двух объемных полупроводниковых структур с отрицательной дифференциальной проводимостью, обладающих вольт-амперными характеристиками N- и S-образной формы. Эти структуры реализуют соответственно функции амплитудного модулятора мощности на диоде Ганна и коммутатора на диоде из халькогенидного стеклообразного полупроводника.

Ключевые слова: отрицательная дифференциальная проводимость, коммутация, модуляция, СВЧ-мощность.

При необходимости перекоммутации мощности в устройствах СВЧ-аппаратуры, таких как модуляторы, дискретные фазовращатели, многоканальные коммутаторы и др., применяют специальные канальные переключатели [1]. При использовании для этих целей $p-i-n$ -диодов с управляемой напряжением проводимостью требования к модуляции и быстродействию противостоят друг другу — для получения глубокой модуляции необходима смена полярности управляющего напряжения, что сказывается на быстродействии. Кроме того, скорость коммутации зависит не только от крутизны фронтов управляющего напряжения, но и от инерционности самих $p-i-n$ -диодов, в связи с чем необходимо наличие дополнительных «ускоряющих» и «вытягивающих» импульсов. К тому же, при проектировании $p-i-n$ -диодов разработчики сталкиваются с противоречащими друг другу требованиями к быстродействию, энергопотреблению и диапазону частот.

Задачей настоящего исследования была разработка быстродействующего двухканального переключателя СВЧ-мощности для радиоволновой информационно-управляющей системы магнитолевитирующих транспортных средств с электродинамическим подвешиванием [2]. Для ее решения в схеме переключения были использованы обладающие отрицательной дифференциальной проводимостью структуры полупроводниковых материалов с вольт-амперными характеристиками N-образной и S-образной формы.

В халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП), обладающих отрицательной дифференциальной проводимостью S-типа, об-

наружен ряд свойств, среди которых особое место занимает электрическая неустойчивость, сопровождающаяся изменением фазового состояния материала [3], что проявляется в резком и быстром переходе состояния структуры из высокоомного в низкоомное. Сопротивление изменяется на много порядков (10^3 – 10^6 раз) [4], а время переключения для ХСП-структур различного стехиометрического состава составляет примерно $1,5 \cdot 10^{-10}$ с. Миниатюрность диодных ХСП-структур позволяет использовать их для коротковолновой части миллиметрового диапазона [5]. Однако даже при наложении стирающего импульса диод остается в низкоомном состоянии из-за присущего ХСП-материалам эффекта памяти (удержание инжектированных носителей в СВЧ-поле, снижение вероятности их выхода из активной зоны и, следовательно, затруднение процессов деполяризации, ведущих к восстановлению исходного высокоомного состояния).

Возможным решением указанной проблемы в нашем случае может быть введение быстродействующего амплитудного модулятора на основе диода Ганна в состав переключателя для прерывания СВЧ-сигнала, поступающего на ХСП-диод. Диод Ганна представляет собой двухэлектродную объемную полупроводниковую структуру, которая при определенном значении приложенного к ней электрического поля проявляет отрицательную дифференциальную проводимость N-типа, вследствие чего возникают электрические колебания в СВЧ-диапазоне длин волн.

Экспериментальные исследования проводились на установке, структурная схема которой приведена на **рис. 1**.

Использовались серийно выпускаемые диоды Ганна типа 3А723Б и экспериментальные

Авторы выражают благодарность В. А. Шкуту за помощь в изготовлении ХСП-структур.

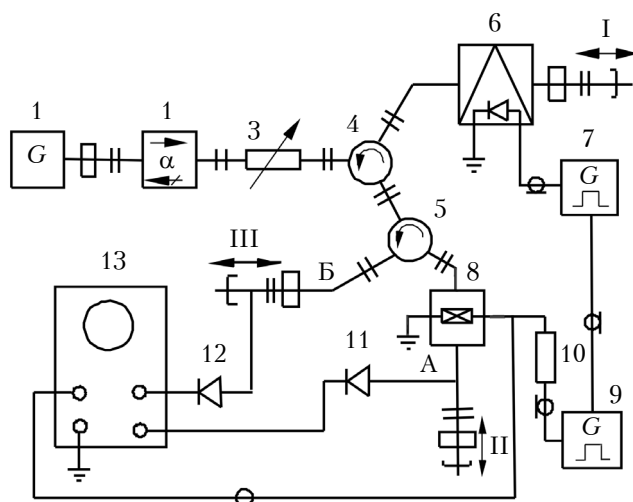


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

1 — СВЧ-генератор с волноводным выходом; 2 — вентиль; 3 — аттенуатор; 4, 5 — трехплечие циркуляторы; 6 — амплитудный модулятор на основе диода Ганна; 7, 9 — генераторы прямоугольных импульсов для управления диодом Ганна и ХСП-диодом соответственно; 8 — ячейка с ХСП-диодом; 10 — нагрузочное сопротивление; 11, 12 — детекторные диоды; 13 — осциллограф; I, II, III — волноводные подвижные коротко замыкающие поршни

сэндвич-структуры из стеклообразного материала системы As—Te—Si с толщиной активной области 1,2 мкм. Структуры получены термическим напылением в вакууме на медную подложку дискообразной формы диаметром 2–2,5 мм, которая выполняет роль одного из электродов и теплоотвода. Второй вывод диода представлял собой тонкую вольфрамовую проволоку, фиксируемую на поверхности ХСП-пленки эпоксидной смолой ЭД-20.

Диод Ганна устанавливали в волноводную модуляторную камеру между широкими стенками волновода. На него подавалось модулирующее напряжение от генератора 7 прямоугольных импульсов с крутыми фронтами, построенного на лампах со вторичной эмиссией 6В2П. При напряжении смещения выше порогового диод генерировал сигнал мощностью 28 мВт. Волноводные подвижные короткозамыкающие поршни I, II, III предназначены для обеспечения оптимального режима модулятора. СВЧ-генерация подавлялась изменением положения диода в волноводе вдоль узких стенок и регулировкой настроечных винтов, образующих трансформатор полных сопротивлений. Подавление генерации происходило в соответствии с механизмом сдерживания флуктуационной неустойчивости внешней цепью [5], так что диод Ганна представлял собой двухполосник, импеданс которого управляется смещающим напряжением.

ХСП-диод припаивали к нижней стенке тонкой (примерно 2,5 мм) емкостной диафрагмы, устанавливаемой между волноводными фланцами. Управляющее напряжение подавалось на

проволочный вывод через фильтр нижних частот (на рис. 1 не показан), конструктивно представляющий собой коаксиальную емкость — электроизолирующий слой на проволочном выводе. На расстоянии $a/4$ (a — размер широкой стенки волновода) от ХСП-диода устанавливали два регулировочных штыря (I, II), а на расстоянии половины длины волны в волноводе $\lambda_B/2$ от плоскости диафрагмы — третий регулировочный штырь (III), т. е. реализовывалась инверсная схема включения [6]. Исходное сопротивление ХСП-диода составляло 379 кОм, сопротивление в низкоомном состоянии находилось в пределах 3–10 Ом в зависимости от тока открытого состояния.

Процесс переключения мощности в каналах во времени t при изменении внутреннего сопротивления ХСП-диода проиллюстрирован на рис. 2.

В исходном состоянии ХСП-диод представляет собой высокоомный элемент. Сигнал отражается от ячейки 8 с ХСП-диодом, поступает в канал Б и фиксируется индикаторным устройством (детектором 12 и осциллографом 13, рис. 1). Перевод ХСП-диода в низкоомное со-

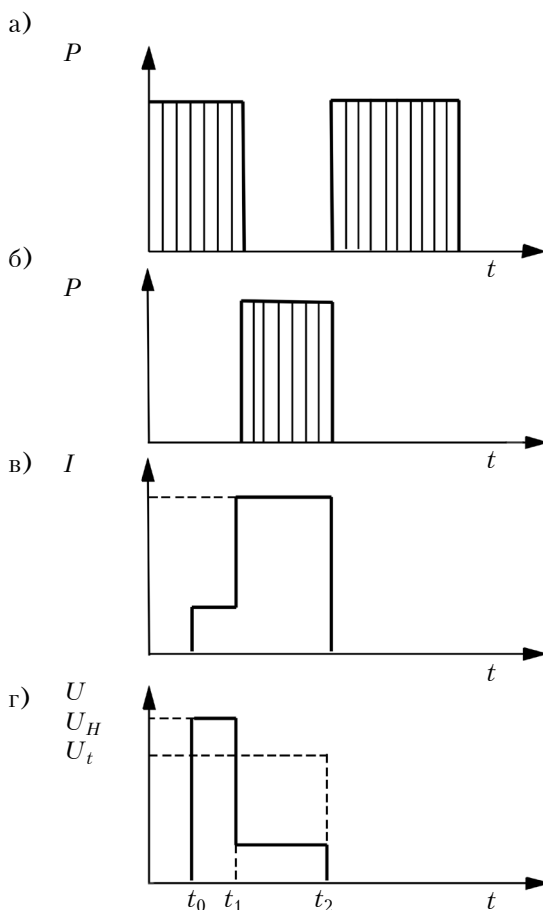


Рис. 2. Иллюстрация переключения мощности в каналах:

a, b — СВЧ-мощность на детекторных диодах 12 и 11 соответственно; c, z — импульсы соответственно тока и напряжения на ХСП-диоде

стояние осуществляется импульсом $U_H > U_t$ длительностью $\tau_H = t_2 - t_0$, который подается генератором 9 (синхронизирован с генератором 7 по фронтам импульсов) и обеспечивает подвод к диоду энергии, большей некоторого значения $W = \chi U_0 I_0(t_0) \tau_H$ (χ — эмпирический коэффициент, зависящий от состава стекла и условий теплоотвода, U_0, I_0 — напряжение и ток поддержания открытого состояния соответственно).

При переходе в низкоомное состояние в момент времени t_1 СВЧ-сигнал проходит через ячейку 8, поступает в канал А и регистрируется индикаторным устройством (детекторным диодом 11 и осциллографом 13). Для вывода ХСП-диода из низкоомного состояния (состояния с эффектом памяти) при наличии СВЧ-мощности и осуществления перекоммутации в момент времени t_3 (рис. 3) на ХСП-диод подается стирающий импульс от генератора 9 длительностью $\tau_c = t_4 - t_3$. Величина импульса достаточна для того, чтобы за время τ_p отсутствия СВЧ-мощности на ХСП-диоде (из-за поглощения мощности диодом Ганна) перевести диод в высокоомное состояние.

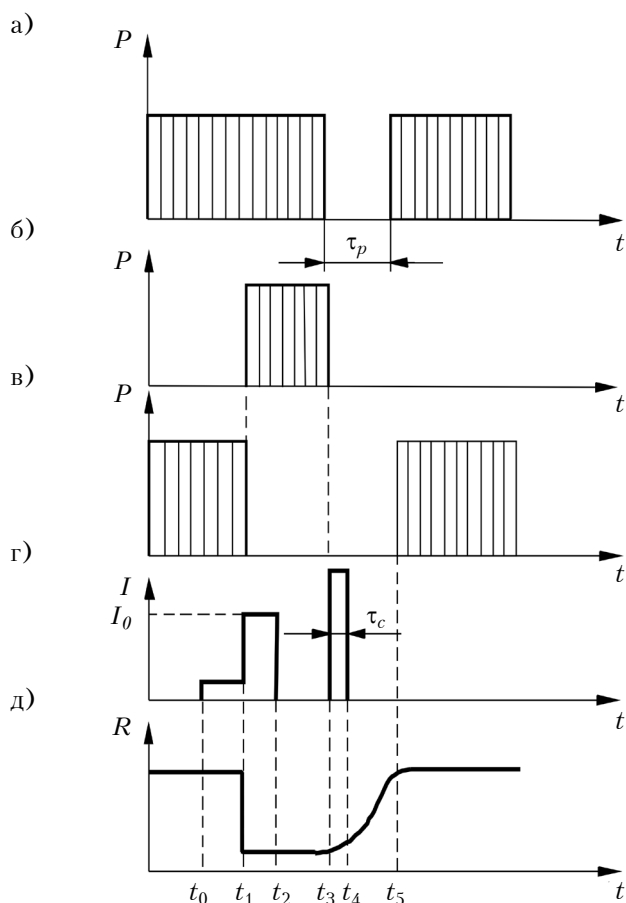


Рис. 3. Временные соотношения импульсов при переводе ХСП-диода в низкоомное состояние: а — СВЧ-мощность на входе циркулятора 5; б — СВЧ-мощность в канале А; в — СВЧ-мощность в канале Б; г — ток через ХСП-структуру; д — временное изменение сопротивления ХСП-структуры

Используемая инверсная схема включения ХСП-ячейки обеспечивала высокие характеристики коммутации при выполнении условия [6] равенства по модулю емкостного реактанса настроечных штырей X_C , индуктивного реактанса проводника к ХСП-диоду X_L и емкостного реактанса ХСП-диода в высокоомном состоянии X_d : $|X_C| = |X_L| = |X_d|$. В ситуации когда ХСП-диод находится в низкоомном состоянии, система штырей образует параллельный резонансный контур ($X_C = X_L$) и СВЧ-сигнал с малыми потерями проходит через ХСП-диод в канал А и фиксируется индикаторным устройством. Когда ХСП-диод переходит в высокоомное состояние, емкость ХСП-диода и индуктивность проводника образуют последовательный резонансный контур ($X_L = X_d$). СВЧ-мощность отражается от ХСП-диода и поступает в канал Б и фиксируется соответствующим индикаторным устройством.

Разработанное переключающее устройство СВЧ-диапазона, построенное на доступной СВЧ-элементной базе и с учетом тенденций развития новых полупроводниковых материалов, представляет собой функционально законченный узел с гарантированным быстродействием и имеет следующие коммутационные характеристики:

- потери на запирающие на центральной частоте 9440 МГц не менее 30 дБ;
- прямые потери при коммутируемой мощности около 10 мВт менее 0,5 дБ
- потребляемый ХСП-диодом ток на реализацию коммутации 150 мкА;
- время переключения не более 10^{-10} с.

Совместное использование полупроводниковых элементов с вольт-амперными характеристиками N- и S-типа — диода Ганна и ХСП-диода — позволяет реализовать быстродействующий двухканальный переключатель в СВЧ-диапазоне, который в режиме функционирования расходует лишь мощность, потребляемую диодом Ганна, в то время как ХСП-диод потребляет энергию управляющего тока лишь в момент коммутации каналов. Это важно, например, для радиоволновой информационно-управляющей системы магнитолевитирующих транспортных средств с электродинамическим подвешиванием.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rebeiz G. M., Uzunkol M. A Low-loss 50-70 GHz SPDT switch in 90 nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 2010. — Vol. 45, N 10. — P. 2003–2007.
2. Plaksin S. V., Sokolovskiy I. I., Pogorelaya L. M. The synthesis of a fast-acting information-control system on

the base of hot-electron devices // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 2006. — Vol. 65, N 8. — P. 741–756.

3. Лебедев Э. А., Пендин К. Д. Фазовые переходы, происходящие в халькогенидных стеклообразных полупроводниках, при воздействии на них импульсов электрического поля и лазерного излучения // *ФТП*. — 1998. — Т. 32, № 8. — С. 939–943.

4. Исаев А. И., Мехтиева С. И., Гарибова С. Н., Зейналов В. З. Электропроводность слоев халькогенидного стеклообразного полупроводника $\text{Se}_{95}\text{As}_5$, содержащего примеси редкоземельных атомов EuF_3 , в сильных

электрических полях // *ФТП*. — 2012. — Т. 46, № 9. — С. 1138–1142.

5. Пласкин С. В., Соколовский И. И. Физические основы построения быстродействующих информационно-управляющих систем на базе полупроводников с горячими электронами. — Севастополь: Вебер, 2006.

6. Белова И. Ф., Дивакова Е. К., Лебедев Е. И. Об одном варианте включения p-i-n-диода в волноводе // *Радиотехника*. — 1974. — Т. 29, № 8. — С. 114–117.

Дата поступления рукописи
в редакцию 07.02 2014 г.

Ю. М. ЛАВРИЧ, С. В. ПЛАКСИН, В. Я. КРИСЬ, Л. М. ПОГОРЕЛА, І. І. СОКОЛОВСЬКИЙ

Україна, м. Дніпропетровськ, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг»

E-mail: plm@westa-inter-com

ДВОХКАНАЛЬНИЙ ПЕРЕМИКАЧ НВЧ-ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

Розроблено двохканальний комутатор НВЧ-потужності в 3-см діапазоні довжини хвиль з використанням двох об'ємних напівпровідникових структур, які мають негативну диференціальну провідність, з вольт-амперними характеристиками N- та S-подібними формами. Ці структури реалізують функції амплітудного модулятора потужності на діоді Ганна та комутатора на діоді з халькогенидного склоподібного напівпровідника.

Ключові слова: негативна диференціальна провідність, комутація, модуляція, НВЧ-потужність.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.25

UDC 621.317: 621.3.08

Yu. N. LAVRICH, S. V. PLAKSIN,

V. Ya. KRIS, L. M. POGORELAYA, I. I. SOKOLOVSKIY

Ukraine, Dnepropetrovsk, Institute of the transport systems and technologies of the NAS of Ukraine «Transmag»

E-mail: plm@westa-inter-com

TWO-CHANNEL MICROWAVE POWER SWITCH CONSTRUCTION ON THE BASIS OF ELECTRICALLY ACTIVE SEMICONDUCTOR STRUCTURES

When constructing the fast-acting two-channel microwave switch, it is difficult to use p-i-n-diodes due to inertia of processes in such structures at change of control voltage polarity for providing of deep modulation. Under the practical realization of the microwave switches on p-i-n-diodes, the requirements to the operating speed of the output signal and to the frequency range are in conflict with each other.

The optimum decision may be to use the bulk (without p-n-junctions) two-electrode semiconductor structures based on the effect of intervalley transfer of electrons (TEDs) and chalcogenide-glass-semiconductors (CGS-diodes) with high operating speed and stability at considerable power levels in the wide frequency band.

The paper presents the construction of the two-channel microwave switch in the three-centimeter range of wave lengths based on bulk semiconductor structures having negative differential conductivity (NDC) of N- and S-type, and realizing the functions of peak power modulator on a TED-diode and the switch on a CGS-diode respectively.

Keywords: negative differential conductivity, commutation, modulation, microwave power.

REFERENCES

1. Rebeiz G.M., Uzunkol M. A low-loss 50–70 GHz SPDT switch in 90 nm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, vol. 45, no 10, pp. 2003–2007.

2. Plaksin S.V., Sokolovskiy I.I., Pogorelaya L.M. The synthesis of a fast-acting information-control system on the base of hot-electron devices. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2006, vol. 65, no 8, pp. 741–756.

3. Lebedev E. A., Tsendin K.D. Phase transitions occurring in glassy chalcogenide semiconductors induced by electric field or laser pulses, *Semiconductors*, 1998, vol. 32, iss. 8, pp. 838–842.

4. Isayev A.I., Mekhtieva S.I., Garibova S.N., Zeynalov V.Z. Conductivity of $\text{Se}_{95}\text{As}_5$ chalcogenide glassy semicon-

ductor layers containing the EuF_3 rare-earth impurity in high electric fields, *Semiconductors*, 2012, vol. 46, iss. 9, pp. 1114–1118.

5. Plaksin S.V., Sokolovskii I.I. *Fizicheskie osnovy postroeniya bystrodeistviyushchikh informatsionno-upravlyayushchikh sistem na baze poluprovodnikov s goryachimi elektronami* [The physical foundation of construction of the fast-acting informative-control systems based on semiconductors with hot electrons] Sevastopol, Veber, 2006, 320 p. (in Russian)

6. Belova I.F., Divakova E.K., Lebedev E.I. [About one variant of p-i-n-diode inclusion into the waveguide] *Radiotekhnika*, 1974, vol. 29, no 8, pp. 114–117 (in Russian)