

## ЭФФЕКТИВНЫЕ ФОТОПРОВОДЯЩИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ GaN

Е.Р. Бурмистров<sup>1), 2), 3)</sup>, Л.П. Авакянц<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1/2, Москва 119234, Россия,  
*eugeni.conovaloff@yandex.ru, avakyants@genphys.phys.msu.ru*

<sup>2)</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское ш. 31, Москва 115409, Россия

<sup>3)</sup>Московский государственный строительный университет, Москва 129337, Россия

Предложен материал в виде многослойной структуры на основе низкотемпературного LT-GaN, выращенного на сапфировых подложках с кристаллографическим направлением (0001)Å для изготовления терагерцевых фотопроводящих антенн. Структуры содержат активные слои из  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , легированные атомами In. При мощности оптической накачки 57 мВт и напряжении смещения 15 В фотопроводящая антенна на оптимизированной структуре {LT- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ : In} испускала терагерцевые импульсы со средней мощностью 4.5 мкВт при частоте следования импульсов 60 МГц. Показана возможность практического применения полученных антенн для задач терагерцевой спектроскопии светодиодных гетероструктур.

**Ключевые слова:** фотопроводящие антенны; терагерцевые импульсы; временные профили; нитрид галлия; многослойные структуры; носители заряда.

## EFFICIENT PHOTOCONDUCTIVE TERAHERTZ SWITCHES ON GaN

E.R. Burmistrov<sup>1), 2), 3)</sup>, L.P. Avakyants<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Lomonosov Moscow State University, 1/2 Leninskie gory, 119234 Moscow, Russia,  
*eugeni.conovaloff@yandex.ru, avakyants@genphys.phys.msu.ru*

<sup>2)</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», 31 Kashirskoe sh., 115409 Moscow, Russia

<sup>3)</sup>Moscow State University of Civil Engineering, 129337 Moscow, Russia

A material in the form of a multilayer structure based on low-temperature LT-GaN grown on sapphire substrates with the (0001)Å crystallographic direction for the manufacture of photoconductive terahertz switches is proposed. The structures contain active layers of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  doped with In atoms. With an optical pumping power of 57 mW and a bias voltage of 15 V, the photoconductive switch on an optimized {LT- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ : In} structure emitted terahertz pulses with an average power of 4.5 μW at a pulse repetition frequency of 60 MHz. The possibility of practical application of the obtained switches for the tasks of terahertz spectroscopy of LED's heterostructures is shown.

**Keywords:** photoconductive switches; terahertz pulses; time profiles; gallium nitride; multilayer structures; charge carriers.

### Введение

В настоящее время ведутся активные поиски эффективных методов генерации и детектирования терагерцевого излучения. В связи с этим фотопроводящие полупроводниковые антенны (PCSWs) зарекомендовали себя как наиболее успешные устройства для терагерцевого диапазона, используемые, например, в методах терагерцевой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDs).

В работах [1, 2] исследуются PCSWs на основе низкотемпературного (LT)-GaAs.

Экспериментально показано, что подвижность двумерных носителей в PCSWs на основе LT-GaAs является низкой ( $200 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ), что обусловлено высокой концентрацией дефектов в материале. Мощность терагерцевого излучения достигает 1.4 мкВт.

Низкая подвижность носителей заряда существенно ограничивает мощность выходного терагерцевого излучения, генерируемого PCSWs на основе LT-InGaAs/GaAs. В этом смысле, нитрид галлия (GaN), обладающий широкой запре-

щенной зоной (3.4 эВ) и высокой подвижностью двумерных носителей ( $\sim 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ), является перспективным материалом для создания PCSWs.

В данной работе впервые исследуются характеристики PCSWs на основе GaN, а также демонстрируется возможность практического применения полученных антенн для задач терагерцевой спектроскопии полупроводниковых устройств на примере светодиодных гетероструктур с множественными квантовыми ямами (МКЯ)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ .

### Результаты и их обсуждение

Важную роль в задачах терагерцевой спектроскопии играют PCSWs. Эти устройства служат как для генерации, так и для детектирования терагерцевых импульсов. В таблице 1 представлены основные характеристики материалов, которые в последние годы наиболее часто применяются для создания PCSWs [3,4].

Табл. 1. Основные параметры полупроводниковых материалов GaN, ZnSe и 6H-SiC

№	$E_g$ , эВ	$\mu$ , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$\tau$ , пс	$\rho$ , $\text{Ом} \cdot \text{см}^{-1}$	$C$ , $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
GaN	3.40	1250	150	$>10^8$	1.30
ZnSe	2.67	400	500	$10^{12}$	0.18
6H-SiC	3.20	200	1000	$>10^{12}$	3.70

В таблице 1 введены обозначения:  $\rho$  – удельное сопротивление,  $C$  – теплопроводность,  $\mu$  – подвижность,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны. Из данных табл. 1 видно, что носители заряда в GaN обладают более коротким временем релаксации  $\tau$  по сравнению с ZnSe, традиционно используемым в качестве подложки для стандартных PCSWs. Одним из ключевых достоинств GaN является его большая ширина запрещенной зоны  $E_g$  ( $\sim 3.4$  эВ). Это свойство позволяет достигать высокой мощности терагерцевого излучения при приложении к PCSW большого напряжения смещения  $U_{DC}$ . Благодаря этому, а также совокупности других несомненных достоинств GaN

становится перспективным материалом для создания PCSWs.

В настоящей работе генерация и детектирование терагерцевых импульсов проводятся с использованием PCSWs на основе GaN. Внешний вид и слоевая схема устройства изображены на рис. 1.

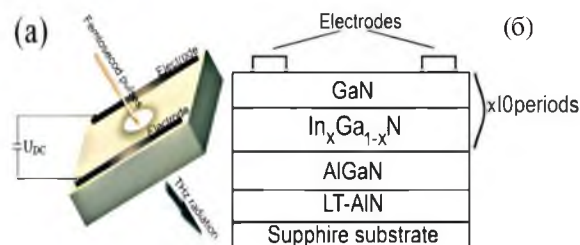


Рис. 1. Внешний вид (а) и слоевая структура (б) фотопроводящей терагерцевой антенны на основе GaN.  $U_{DC}$  – напряжение смещения

Структуры получены с использованием техники металлоорганического химического осаждения (MOCVD). На сапфировой подложке с кристаллографическим направлением (0001) выращивается буферный слой LT-AlN толщиной 100 нм. Затем формируется промежуточный слой AlGaIn толщиной 50 нм. Активная область включает 10 периодов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  толщиной 5/15 нм. Мольная доля  $x_{In}$  выбрана равной 0.32.

На поверхности структур методом фотолитографии изготавливаются PCSWs. Металлическая композиция Ti/Al/Ni/Au наносится методом термического напыления, и затем вся структура отжигается в течение 1 минуты при температуре 780°C для формирования омических контактов.

Излучение Ti: сапфирового лазера с длительностью импульсов 130 фс, на длине волны 800 нм, со средней выходной мощностью излучения 57 мВт и с частотой следования импульсов 60 МГц разделялось на две части, одна из которых попадала на исследуемую PCSW, а вторая после прохождения линии задержки — на PCSW-детектор. Измерения проводились при оптической мощности 57 мВт и напряжении смещения  $U_{DC}=15$  В.

Терагерцевые электромагнитные волны генерируются в результате преобразова-

ния фемтосекундных импульсов, подаваемых на PCSW, в излучение терагерцевого диапазона. Эффективность преобразования энергии лазерного излучения в энергию короткоживущих носителей заряда может быть представлена как отношение энергии, перешедшей в носители заряда, к полной энергии, доставляемой лазерным излучением:

$$\eta = Q_e / (Q_e + E_l) \quad (1)$$

$$Q_e = U_{DC}^2 t / R,$$

где  $U_{DC}$ ,  $R$  – напряжение смещения и сопротивление на PCSW1,  $E_l$ ,  $t$  – энергия и длительность лазерных импульсов

На рис. 2 изображены временная форма и частотный спектр терагерцевых импульсов от PCSWs на основе GaN.

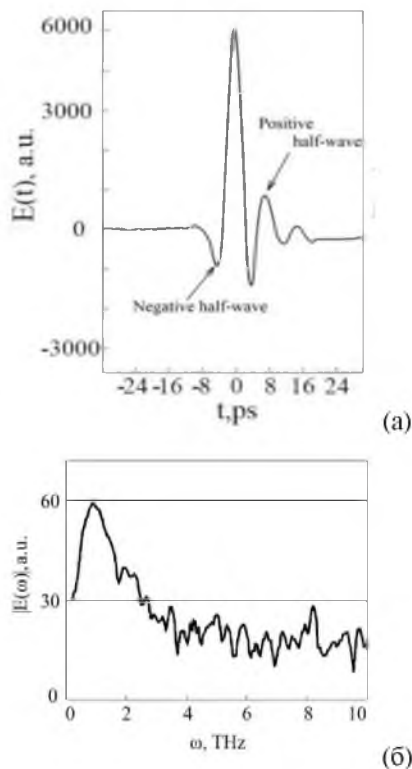


Рис. 2. Временная форма (а) и частотный спектр (б) терагерцевого импульса от фотопроводящей терагерцевой антенны на основе GaN

Полученный временной профиль представляет собой однопериодное колебание электрического поля с положительными и отрицательными полуволнами. Из рис. 2(б) видно, что частотный спектр сильно моду-

лирован. Полоса пропускания PCSWs на основе GaN составляет 10 ТГц. Измеряемая с помощью ячейки Голя мощность выходного терагерцевого излучения достигла 4.5 мкВт. Конверсия мощности фемтосекундного импульса в мощность терагерцевого составила 0.008%.

## Закключение

В работе предложен материал на основе низкотемпературного GaN для получения терагерцевых фотопроводящих антенн. Структуры содержат активные слои из LT-GaN легированные атомами In. Структуры были получены с использованием техники металлоорганического химического осаждения на подложках  $Al_2O_3$  с кристаллографическим направлением  $(0001)\text{\AA}$ . При мощности оптической накачки 57 мВт и напряжении смещения 15 В фотопроводящая антенна на оптимизированной структуре  $\{LT-In_xGa_{1-x}N/GaN: In\}$  испускала терагерцевые импульсы со средней мощностью 4.5 мкВт при частоте следования 60 МГц, эффективность преобразования составила 0.008%. Максимум спектра PCSW на основе GaN располагался 1.0-1.2 ТГц, а спектральная плотность мощности сосредоточена на частотах менее 2 ТГц.

## Библиографические ссылки

1. Klimov E., Klochkov A., Solyankin P., Pushkarev S., Galiev G., Yuzeeva N., et al. Terahertz photoconductive antennas based on silicon-doped GaAs (111)A. *International Journal of Modern Physics B* 2024; 38(28): 2450378.
2. Kuznetsov K., Klochkov A., Leontyev A., Klimov E., Pushkarev S., Galiev G., et al. Improved InGaAs and InGaAs/InAlAs Photoconductive Antennas Based on (111)-Oriented Substrates. *Electronics* 2020; 9(3): 495.
3. Imafuji O., Singh B.P., Hirose Y., Fukushima Y., Takigawa S. High power subterahertz electromagnetic wave radiation from GaN photoconductive switch. *Applied Physics Letters* 2007; 91: 071112.
4. Meng P., Zhao X., Yang X., Wu J., Xie Q., He J., et al. Breakdown phenomenon of ZnO varistors caused by non-uniform distribution of internal pores. *Journal of the European Ceramic Society* 2019; 39(15): 4824-4830.