

ЭФФЕКТИВНЫЕ ФОТОПРОВОДЯЩИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ GaN

Е.Р. Бурмистров^{1), 2), 3)}, Л.П. Авакянц¹⁾

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

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

³⁾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 $\{\text{LT-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}:\text{In}\}$ 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^{1), 2), 3)}, L.P. Avakyants¹⁾

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

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

³⁾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 $\{\text{LT-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}:\text{In}\}$ 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	μ , $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	τ , пс	ρ , $\text{Ом} \cdot \text{см}^{-1}$	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: ρ – удельное сопротивление, C – теплопроводность, μ – подвижность, E_g – ширина запрещенной зоны. Из данных табл. 1 видно, что носители заряда в GaN обладают более коротким временем релаксации τ 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 (~ 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.

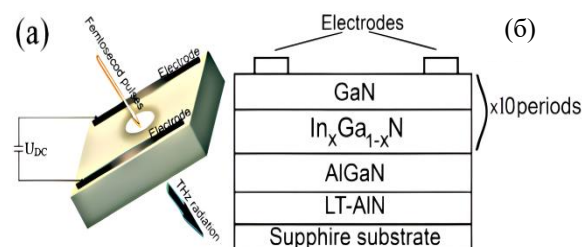


Рис. 1. Внешний вид (а) и слоевая структура (б) фотопроводящей терагерцевой антенны на основе GaN. U_{DC} – напряжение смещения

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.

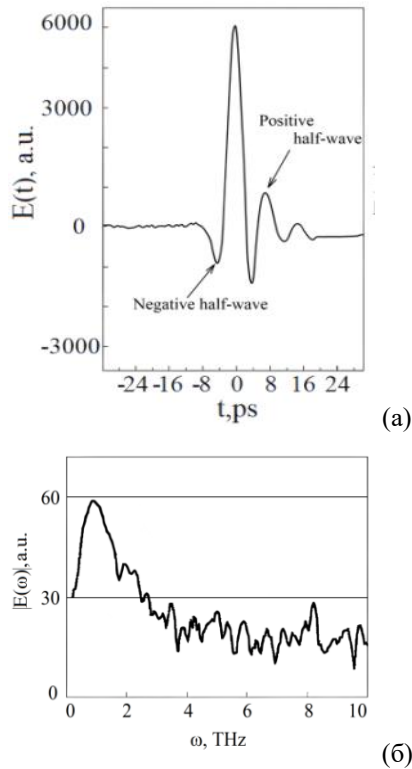


Рис. 2. Временная форма (а) и частотный спектр (б) терагерцевого импульса от фотопроводящей терагерцевой антенны на основе GaN

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%.

Заключение

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.