

УДК 621.315.592

XXI Международный симпозиум „Нанопластика и наноэлектроника“,
Нижний Новгород, 13–16 марта 2017 г.

Оптический тиристор на основе системы материалов GaAs/InGaP

© Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, С.М. Некоркин, О.В. Вихрова[¶], А.В. Здравейщев,
А.В. Кудрин, В.Е. Котомина

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

[¶] E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

(Получена 27 апреля 2017 г. Принята к печати 12 мая 2017 г.)

Показана возможность создания тиристорных структур с внешним оптическим управлением лазерным излучением с длиной волны ~ 800 нм на основе монокристаллических пластин полуизолирующего GaAs и слоев согласованного по параметру решетки с GaAs твердого раствора InGaP.

DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45087.01

1. Введение

Полупроводник GaAs обладает рядом преимуществ, по сравнению с кремнием, как материал, перспективный для создания оптических тиристорных (фототиристорных). Во-первых, это большая термостабильность и более высокие значения напряжения пробоя в области $p-n$ -перехода. Во-вторых, эффективное поглощение и генерация фотонов, что является важным фактором для реализации оптического управления. В-третьих, значительно более высокая подвижность носителей заряда и, следовательно, более высокое быстродействие.

Основные разработки в данной области выполнены для гетероструктур GaAs/AlGaAs. Это цикл работ под руководством Ж.И. Алфёрова по созданию на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs высоковольтных диодов и тиристорных. Были изготовлены и исследованы тиристоры с электрическим и оптическим управлением [1–3]. Активная область таких приборов содержала высокоомный нелегированный слой GaAs, изготовленный жидкофазной эпитаксией. За рубежом примерно в это же время была предложена конструкция высоковольтного коммутатора с базовой областью на основе подложек полуизолирующего GaAs (i -GaAs) [4–6]. Вместо нелегированного слоя GaAs активная область прибора $p-i-n$ представляла собой пластину полуизолирующего GaAs. С обеих сторон пластины i -GaAs выращивались эпитаксиальные катодные и анодные слои GaAs и AlGaAs [4–6]. Структура оптического тиристора содержала пять областей ($n-p-i-n-p$). По сравнению с достижениями работ [1,2], авторам удалось повысить величину пикового тока до 300 А при скорости нарастания $1.5 \cdot 10^{10}$ А/с для структуры с величиной блокирующего напряжения 800 В.

В данной работе исследовалась возможность создания тиристорных структур с внешним оптическим управлением на основе монокристаллических пластин полуизо-

лирующего GaAs и слоев согласованного по параметру решетки с GaAs твердого раствора InGaP.

2. Методика эксперимента

Изготовление структур осуществлялось методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении в два этапа. Вначале на подложке i -GaAs (толщиной 450 мкм) выращивались катодные слои: p -GaAs:C (толщиной 5 мкм), n^+ -GaAs:Si (0.2 мкм), n -InGaP:Si (0.4–0.5 мкм) и контактный слой n^+ -GaAs:Si (0.12–0.2 мкм). Затем пластина i -GaAs с использованием химического травления утончалась до 200 мкм, и с обратной стороны подложки выращивались анодные слои структуры: n -GaAs:Si и p^+ -GaAs:C толщиной 1–1.1 мкм. С обеих сторон структуры электронно-лучевым испарением в вакууме формировались омические контакты на основе золота. Далее с использованием двухсторонней фотолитографии и химического травления были изготовлены образцы оптоотиристорных, представляющие собой мезаструктуры с площадью металлических контактов 6.3 мм^2 и оптическим окном диаметром 1 мм в центре (рис. 1).

С использованием источника-измерителя Keithley-2400 исследовались темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ВАХ при освещении излучением (с длиной волны 800 нм) лазерного диода (мощностью до 160 мВт), функционирующего в постоянном режиме. Также было реализовано изучение коммутационных характеристик оптоотиристора при работе лазера в импульсном режиме. Для этого была разработана схема (рис. 2), включающая в себя блок крепления оптоотиристора и лазерного диода, RC-цепь для подачи внешнего напряжения на исследуемый образец, нагрузочное сопротивление (R_H), сигнал с которого поступал на осциллограф RIGOL DS1022C, соединенный с

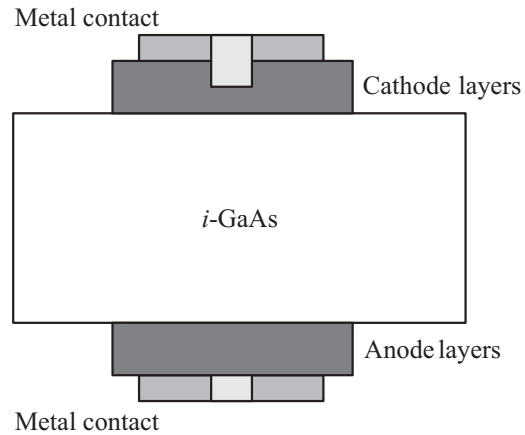
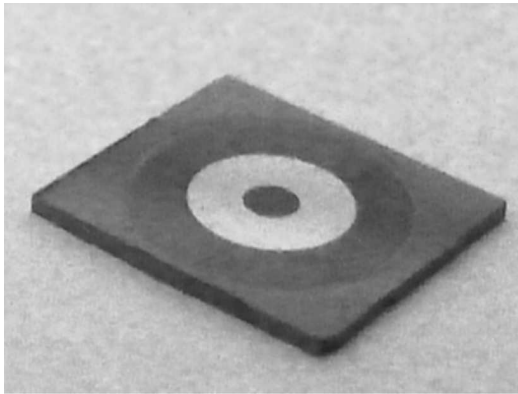


Рис. 1. Фотографическое изображение и схема оптического тиристора, изготовленного на основе пластин полупроводящего арсенида галлия.

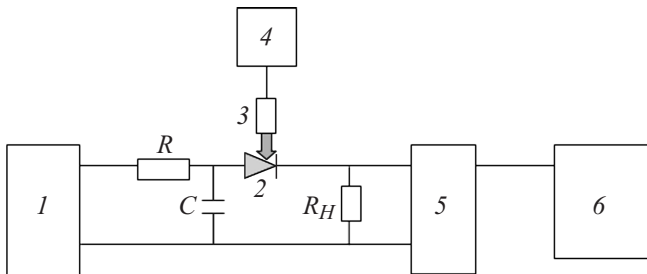


Рис. 2. Схема изучения коммутационных характеристик оптических тиристоров: 1 — источник напряжения, 2 — исследуемый оптотиристор, 3 — лазерный диод, 4 — блок питания лазера в импульсном режиме, 5 — осциллограф RIGOL DS1022C, 6 — персональный компьютер.

персональным компьютером. Параметры RC -цепи и нагрузочного сопротивления имели следующие значения $C = 15 \text{ мкФ}$, $R = 50 \text{ кОм}$ и $R_H = 0.3 \text{ Ом}$.

Напряжение (величиной до 200 В) между анодом и катодом подавалось на исследуемый образец через RC -цепь, излучение лазера фокусировалось на оптическое окно тиристора со стороны катода (длительность импульса лазерного излучения 10 мкс, энергия лазера $\sim 5 \text{ мкДж}$, частота повторения 500 Гц). Излучение поглощалось активной областью прибора, в результате через тиристор протекал ток, о величине которого судили по напряжению на сопротивлении нагрузки, сигнал с которого подавался на вход осциллографа. Анализировались пиковые значения тока (I), время (t), в течение которого они достигаются, и скорость нарастания тока (di/dt) через оптотиристор в зависимости от величины подаваемого напряжения между анодом и катодом.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследования темновых вольт-амперных характеристик показали, что в режиме прямого смещения (ра-

бочем режиме оптотиристора), при положительном напряжении между анодом и катодом (U_{AC}), темновой ток составляет 12 мкА при напряжении 200 В (рис. 3). При дальнейшем увеличении напряжения оптотиристор пробивался.

Вольт-амперные характеристики при освещении лазерным излучением в постоянном режиме снимались в двух режимах работы прибора Keithley-2400: источника напряжения и источника тока. В первом случае напряжение между анодом и катодом изменялось в прямом направлении (от 0 до 200 В) и обратном направлении (от 200 В до 0). Как видно из рис. 4, полученная ВАХ имеет гистерезисный вид. В прямом направлении при напряжениях $U_{AC} = 30\text{--}40 \text{ В}$ наблюдается резкое возрастание тока через тиристор до величины более 100 мА (зависимость 2 на рис. 3). Это свидетельствует о возникновении лавинообразного процесса переноса заряда через активную область прибора. Ограничение тока величиной 100 мА связано с допустимыми преде-

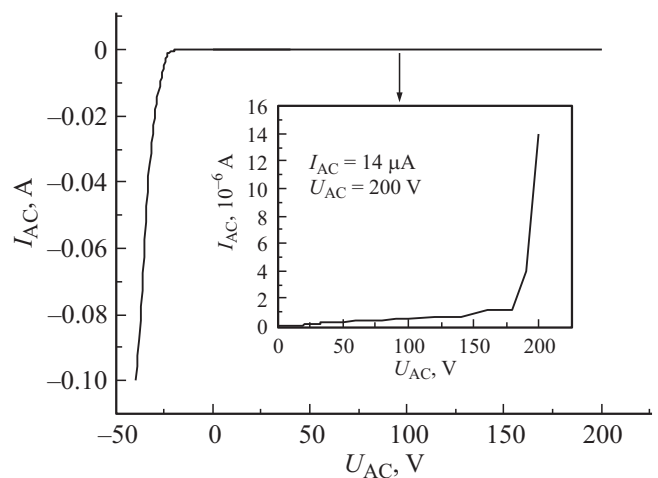


Рис. 3. Темновая вольт-амперная характеристика оптотиристора. На вставке представлена в увеличенном масштабе прямая ветвь приведенной ВАХ.

лами измеряемых Keithley-2400 параметров. Обратная ветка ВАХ смещена в область меньших напряжений, резкий спад тока (по сути закрытие прибора) происходит при напряжении около 20 В. Данная величина интерпретируется как остаточное напряжение прибора. Изучение ВАХ оптотиристора в режиме источника тока (рис. 4, кривая 1) позволяет получить характерную для тиристорных s -образную зависимость тока от напряжения.

Результаты предварительных исследований процесса протекания тока через тиристор при импульсном оптическом управлении отражены в таблице. На рис. 5

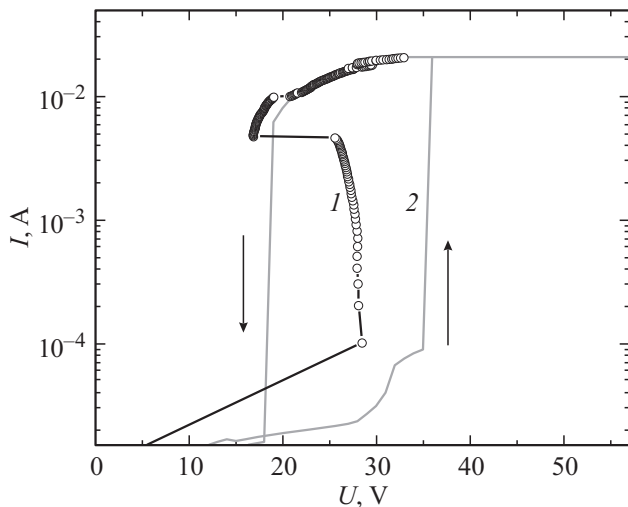


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики оптического тиристора, полученные при освещении излучением лазера с длиной волны 800 нм, работающего в постоянном режиме (мощность лазера 25 мВт). Зависимость 1 получена в режиме источника тока. Зависимость 2 — в режиме источника напряжения. Измерения проводились с использованием источника-измерителя Keithley-2400.

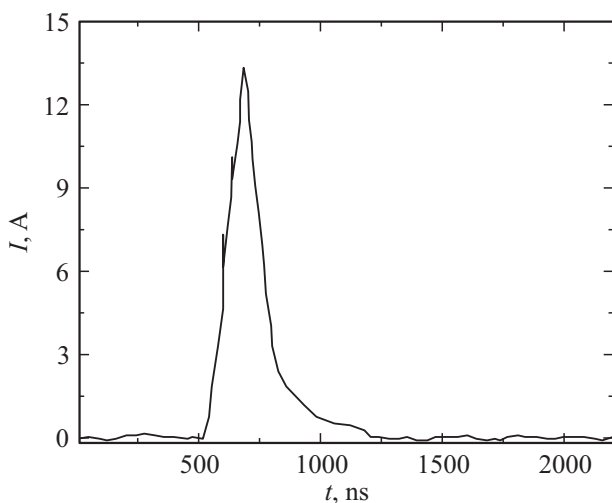


Рис. 5. Импульс тока через нагрузочное сопротивление ($U_{AC} = 120$ В) при управлении импульсом излучения лазера с длиной волны 800 нм, длительностью 10 мкс и энергией 5 мкДж.

Пиковые значения тока и скорость нарастания тока (di/dt) через оптотиристор в зависимости от величины подаваемого напряжения между анодом и катодом

U_{AC}	I , А	t , нс	di/dt
120	13	160	$8 \cdot 10^7$
150	16.7	120	$1.4 \cdot 10^8$
200	25	120	$2 \cdot 10^8$

Примечание. t — время, в течение которого достигается пиковое значение тока (I).

показан вид сигнала с сопротивления нагрузки (импульс тока), зарегистрированный с использованием осциллографа. Из представленных в таблице данных видно, что такие характеристики прибора, как пиковые значения тока, скорость нарастания тока через оптотиристор, время, в течение которого достигается пиковое значение тока, зависят от величины подаваемого напряжения между анодом и катодом. Пиковое значение тока возрастает с увеличением U_{AC} и достигает 25 А при $U_{AC} = 200$ В. При этом время нарастания тока уменьшается до 120 нс, в итоге увеличивается скорость нарастания тока до $2 \cdot 10^8$ А/с. Скорость нарастания импульса тока характеризует быстродействие изготовленного прибора. Полученное значение меньше зарегистрированного предельного значения для оптических тиристорных подобной конструкции на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs — $1.5 \cdot 10^{10}$ А/с [4]. Следует отметить, что данный факт обусловлен выбранными условиями эксперимента, а именно длительностью импульса лазерного излучения (10 мкс), параметрами RC-цепи, формирующими импульс напряжения, подаваемого на анод и катод прибора. В дальнейшем планируется провести исследования имеющихся образцов оптотиристорных с использованием оборудования, позволяющего работать с наносекундными длительностями импульса лазерного излучения.

4. Заключение

Таким образом, методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении на основе подложек полуизолирующего GaAs были изготовлены и исследованы тиристорные гетероструктуры GaAs/InGaP. Показана возможность внешнего оптического управления током через тиристор с использованием лазера с длиной волны излучения около 800 нм, функционирующего в постоянном или импульсном режиме. Продемонстрировано, что темновые вольт-амперные характеристики изготовленных оптотиристорных и их ВАХ при освещении лазером в постоянном режиме излучения имеют особенности, характерные для тиристорных структур. Обнаружено, что максимальные наблюдаемые пиковые значения тока достигали 25 А при напряжении между анодом и катодом 200 В при импульсном воздействии лазера.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности дальнейшей разработки оптотиристорных на основе

соединений GaAs и InGaP с оптическим управлением на длине волны лазерного излучения около 800 нм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-07-01102_а) и проектной части государственного задания Министерства образования и науки России (проект № 8.1751.2017/ПЧ).

Список литературы

- [1] В.И. Корольков, В.Г. Никитин, Н.Р. Рахимов. Письма ЖТФ, **2**, 941 (1976).
- [2] Ж.И. Алфёров, В.М. Ефанов, Ю.М. Задиранов, А.Ф. Кардосысоев, В.И. Корольков, С.И. Пономарев, А.В. Рожков. Письма ЖТФ, **12**, 1281 (1986).
- [3] В.И. Корольков, Н.Ю. Орлов, А.В. Рожков, Ф.Ю. Солдатенков, М.Н. Степанова. ФТП, **29**, 400 (1995).
- [4] J.H. Hur, P. Hadizad, S.G. Hummel, K.M. Dzurko, P.D. Darkus, H.R. Fetterman, M.A. Gundersen. IEEE Trans. Electron Dev., **37** (12), 2520 (1990).
- [5] J.H. Zhao, T. Burke, D. Larson, M. Weiner, A.Chin, J.M. Ballingell, T.H. Yu. IEEE Trans. Electron Dev., **40** (4), 817 (1993).
- [6] J.H. Zhao, T. Burke, M. Weiner, A. Chin, J.M. Ballingall. IEEE Trans. Electron Dev., **41**, 819 (1994).

Редактор Г.А. Оганесян

Optical thyristor based on the GaAs/InGaP material system

*B.N. Zvonkov, N.V. Baidus, S.M. Nekorkin,
O.V. Vikhrova, A.V. Zdoroveyshev,
A.V. Kudrin, V.E. Kotomina*

Physico-Technical Research Institute
of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The possibility of creating thyristor structures with external optical control by laser radiation with a wavelength of ~ 800 nm is shown on the basis of single-crystal semi-insulating GaAs plates and layers of the InGaP solid solution matched to the GaAs lattice parameter.