

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томский государственный архитектурно-строительный университет  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК**

Сборник научных трудов  
XII Международной конференция студентов и молодых ученых

**21–24 апреля 2015 г.**

## **PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT**

XII International Conference of students and young scientists

**21–24 April, 2015**

Томск 2015

УДК 50(063)  
ББК 20л0  
П27

**Перспективы развития фундаментальных наук** [Электронный П27 ресурс] : сборник трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых (Томск, 21–24 апреля 2015 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 1556 с.

ISBN 978-5-4387-0560-4

Сборник содержит труды участников XII Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук». Включает доклады студентов и молодых ученых, представленные на секциях «Физика», «Химия», «Математика», «Биология и медицина», «Нanomатериалы и нанотехнологии», «Технология», «Конкурс архитектурных работ», «IT-технологии и электроника».

Предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей в области естественных наук и высшей математики.

УДК 50(063)  
ББК 20л0

*Редакционная коллегия*

И.А. Курзина, доктор физико-математических наук, доцент ТПУ.  
Г.А. Воронова, кандидат химических наук, доцент ТПУ.  
С.А. Поробова, инженер ТГАСУ.

ISBN 978-5-4387-0560-4

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ,  
электронный текст, 2015

**ОПТИЧЕСКОЕ ВЫПРЯМЛЕНИЕ В ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ GaSe**Г.В. Ланский, К.А. Кох, В.А. Светличный

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Ю.М. Андреев

Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: k.a.kokh@gmail.com

**OPTICAL RECTIFICATION IN DOPED GaSe CRYSTALS**G.V. Lanskiy, K.A. Kokh, V.A. Svetlichnyi

Scientific Supervisor: Prof. Yu.M. Andreev

Tomsk State University,

Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: k.a.kokh@gmail.com

**Annotation.** *Doped GaSe crystals are useful and prospective for THz generation by optical rectification. At optimal dopant concentration, the samples show better characteristics than materials used in commercial devices.*

В качестве базовых элементов в составе коммерческих электрооптических детекторов и оптических выпрямителей (как генераторов ТГц излучения) наибольшую популярность получило применение кубического кристалла ZnTe. Он характеризуется линейным электрооптическим коэффициентом  $r_{41}=3,9$  пм/В, который, как хорошо известно, линейно связан со значением коэффициента нелинейной восприимчивости второго порядка  $d_{ij}$ . Для эффективного использования в качестве оптического выпрямителя длина волны излучения накачки кристалла ZnTe должна быть в диапазоне 760–840 нм, что удачно совпадает с диапазоном излучения титан-сапфирового фемтосекундного лазера 680–1080 нм. При этом, оптимальная толщина кристалла для генерации излучения в диапазоне 0,2–3 ТГц лежит в пределах 2–0,3 мм, а значительное поглощение ( $>40$  см<sup>-1</sup>) и высокая дисперсия на частотах выше 3,5 ТГц ограничивают эффективность оптического выпрямления и спектральную ширину выходного излучения. Предельная интенсивность накачки излучением титан-сапфирового лазера ограничивается двухфотонным поглощением, что снижает выходные энергетические параметры генерируемого ТГц излучения. Несмотря на 4-хкратно меньший нелинейный коэффициент, более высокую эффективность генерации на частотах свыше 3,5 ТГц демонстрируют кубические кристаллы GaP, характеризующиеся меньшим уровнем оптических потерь. Свои достоинства и недостатки имеют другие кубические полупроводниковые кристаллы: GaAs, InAs, и др. с близкими возможностями в целом и дополняющими друг друга в деталях. Отличительными особенностями гигроскопичных и имеющих низкую лучевую стойкость органических анизотропных кристаллов DAST являются в десятки раз большие электрооптический и нелинейный коэффициенты, малое поглощение в высокочастотной части ТГц спектра. Эти свойства и сложность выращивания образцов больших размеров обусловили

## «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

преимущественное использование на практике монокристаллических пленок из DAST субмиллиметровой толщины с накачкой маломощными источниками накачки.

Последние 20 лет, в качестве электрооптического детектора и оптического выпрямителя в лабораторных условиях, широко применяется слоистый полупроводниковый кристалл GaSe с неординарными физическими свойствами:  $r_{41}=14,4$  пм/В,  $d_{22}=24,3$  пм/В, диапазон пропускания 0,62–20 мкм и далее на длинах волн более 50 мкм, двулучепреломление 0,35 в среднем ИК и 0,79 в ТГц диапазоне. Кристалл прост в производстве и дешёв, выращенные образцы имеют сантиметровые размеры. Установлено, что кристаллы GaSe имеют более высокую лучевую стойкость по отношению к кристаллам ZnTe и соответствующие преимущества в энергетических параметрах генерируемого ТГц излучения при плотности энергии накачки свыше 5,2 мДж/см<sup>2</sup> [1]. Тем не менее, кристалл непригоден для коммерческого применения из-за чрезвычайно низких механических свойств, относительно невысокого оптического качества и лучевой стойкости, обусловленных слабой электростатической связью слоев роста.

Эти недостатки в значительной мере устраняются легированием кристаллов GaSe изовалентными элементами. Так, оптимально легированные теллуром GaSe:Te(0,38 масс.% по ростовой закладке) [2] на 15–20% увеличивает лучевую стойкость, что дает преимущество начиная с плотности энергии накачки 4,5 мДж/см<sup>2</sup> [1]. В последнее время стало также известно, что оптимальное легирование серой увеличивает преимущество в 4–5 раз [3], однако, исследования возможностей применения легированных кристаллов GaSe:S в качестве оптических выпрямителей до сих пор не проводились.

Целью данной работы является детальное сравнительное исследование возможностей кристаллов GaSe, легированных Te, а также оптимально легированных In и S.

В работе использован модифицированный метод синтеза поликристаллического материала и модифицированный вертикальный ростовой метод Бриджмена с вращением теплового поля, позволяющие выращивать кристаллы с 3-хкратно меньшим коэффициентом оптических потерь по сравнению с кристаллами, выращенными с использованием традиционных технологий [4]. В исходные ростовые закладки для синтеза поликристаллического материала GaSe были добавлены 0,01–2,07 масс.% Te, оптимальные содержания S – 2,5 масс.% и In – 0,75 масс.% In. Рабочие образцы были изготовлены методом отслоения и дополнительной обработке не подвергались. Они имели р-тип проводимости, структуру  $\epsilon$ -политипа GaSe и уровень оптических потерь в окне максимальной прозрачности на уровне 0,03 см<sup>-1</sup>. Минимальный уровень оптических потерь в длинноволновой части ТГц диапазона 0,2–0,6 ТГц (о-волна) был на уровне 0,2 см<sup>-1</sup>. Эксперимент повторял условия исследований работы [1]. В качестве источника накачки был использован 100-фс титан-сапфировый лазер, работающей на длине волны 800 нм с частотой повторения импульсов 5,2 МГц. Пучок накачки, с плотностью энергии до 7 мДж/см<sup>2</sup>, направлялся ортогонально входной плоскости кристалла с поляризацией в плоскости ab. Пучок фокусировался до диаметра ~45 мкм, при котором не наблюдалось признаков разрушений. Остаточное излучение накачки блокировалось Si-пластинкой. Генерируемое ТГц излучение фокусировалось на поверхность электрооптического детектора из кристалла ZnTe (110) толщиной 100 мкм. Эксперимент проводился в заполненном азотом боксе.

На Рис. 1. показано влияние легирующей добавки и уровня легирования Te на эффективность оптического выпрямления (генерацию ТГц излучения). Оптимальное содержание Te в ростовой закладке

## «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

составило 0,38 масс.%, как и при генерации перестраиваемого излучения в пределах среднего ИК диапазона [5]. Легирование In дало не отличимый от легирования Te результат, т.е. примерно 20% увеличение эффективности генерации при оптимальном уровне легирования, при этом отклонение от линейной зависимости увеличения средней выходной мощности не наблюдалось, в то время как для коммерческого кристалла ZnTe отклонение от линейности заметно, по крайней мере, начиная с уровня плотности энергии накачки  $>3$  мДж/см<sup>2</sup> и обусловлены, прежде всего, нелинейным двухфотонным поглощением и поглощением на генерируемых при этом, свободных носителях заряда. Коэффициент двухфотонного поглощения в кристалле GaSe (0,56 см/ГВт) на длине волны накачки почти в 8 раз ниже, чем в ZnTe (4,2 см/ГВт), поэтому свободных носителей заряда генерируется значительно меньше.

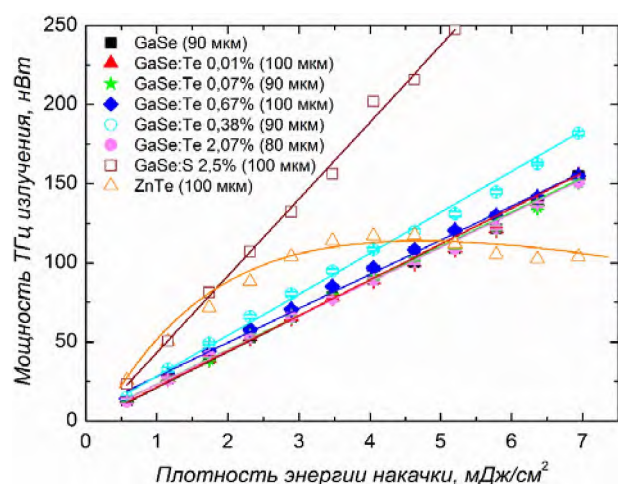


Рис.1. Зависимость средней выходной мощности ТГц излучения на выходе оптического выпрямителя от легирующей примеси и ее содержания

Преимущество оптимально легированных серой кристаллов GaSe:S(2,5 масс.%), как и ожидалось, оказалось существенно более высоким при дополнительной фокусировке излучения накачки (Рис. 1). При этом, все возможности оптимизации не использованы и есть резерв увеличения выходной мощности за счет увеличения мощности накачки. Таким образом, можно ожидать, что оптимально легированный серой кристалл GaSe станет перспективным материалом как для оптических выпрямителей –

генераторов ТГц излучения, так и для электрооптических детекторов ТГц излучения.

*Работа выполнена при поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chu W.-C., Ku S.-A., Wang H. J., et al. Widely linear and non-phase-matched optics-to-THz conversion on GaSe:Te crystals // Optics Letters. – 2012. – V.37. – No.5. – P.945–947.
2. Ku S.-A., Chu W.-C., Luo C.-W., et al. Optimal Te-doping in GaSe for non-linear applications // Optics Express. – 2012. – V. 20. – No. 5. – P. 5029–5037.
3. Feng Z.-S., Kang Z.-H., Li X.-M., et al. Impact of fs and ns pulses on solid solution crystals Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Se and GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> // AIP Advances. – 2014. – V. 4. – No. 3. – Paper No. 037104. P. 1–6.
4. Kokh K.A., Molloy J.F., Naftaly M., et al. Growth and optical properties of solid solution crystals GaSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub> // Materials Chemistry Physics. – 2015. – V. 154. – P. 152–157.
5. Лубенко Д.М., Лосев В.Ф., Андреев Ю.М., и др. Генерация фемтосекундных импульсов в среднем ИК и ТГц диапазонах в кристаллах GaSe<sub>1-x</sub>Tex // Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т. 79. – № 2. – С. 300–304.