

# Краткие сообщения

05;06;07

## Детекторы оптического излучения на основе слоистых кристаллов GaSe и InSe

© А.Г. Кязым-заде, А.А. Агаева, В.М. Салманов, А.Г. Мохтари

Бакинский государственный университет,  
370145 Баку, Азербайджан  
e-mail: bsu\_aydin@yahoo.com

(Поступило в Редакцию 9 января 2007 г. В окончательной редакции 11 мая 2007 г.)

На основе кристаллов GaSe и InSe разработаны быстродействующие неохлаждаемые детекторы оптического излучения, позволяющие регистрировать ультракороткие ( $10^{-9}$ – $10^{-12}$  s) лазерные импульсы в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Показано, что малая инерционность этих приемников обусловлена наличием в указанных кристаллах быстрых каналов рекомбинации с большим сечением захвата.

PACS: 72.40.+w, 73.50.Pz, 72.80.Jc

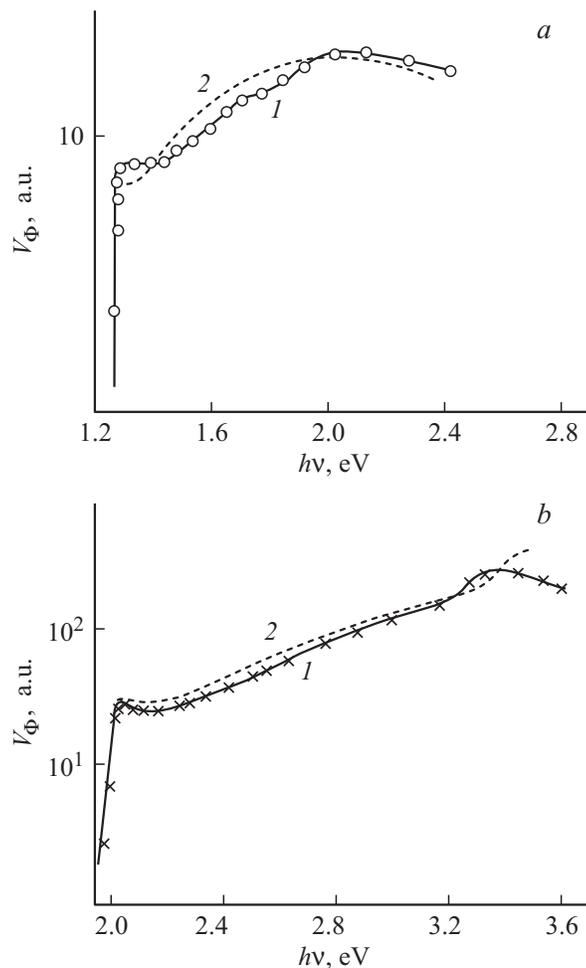
Регистрация лазерных импульсов при комнатной температуре является одним из актуальных вопросов техники [1–4]. В настоящее время существуют несколько типов приборов, позволяющих регистрировать лазерные импульсы. Так, например, для той цели используют вакуумный фотоэлемент с внешним фотоэффектом, отличающийся сложностью конструкции. Кроме того, высокое напряжение питания этого прибора требует использования специальных высоковольтных источников тока. Известные малоинерционные поверхностно-барьерные германиевые и кремниевые фотодиоды также имеют очень сложную технологию изготовления. С другой стороны, простые по технологии изготовления и схемам включения фоторезисторы обладают большой инерционностью, что не позволяет использовать их для регистрации лазерных импульсов.

Среди новых материалов, тестируемых для этой цели, полупроводниковые кристаллы селенида галлия (GaSe) и индия (InSe) показывают многообещающие характеристики. Известно, что кристаллы GaSe и InSe принадлежат к полупроводниковому семейству  $A^3B^6$ , обладают слоистой структурой, обусловленной различными типами химических связей вдоль слоев (ковалентная связь) и между слоями (ван-дер-ваальсова связь). Существование слабой связи между слоями и отсутствие оборванных связей, практически исключающих возможность образования поверхностных уровней, концентрация которых на два порядка меньше, чем в обычных полупроводниках, делает возможным простым скалыванием слоев изготовление оптически однородных образцов толщиной вплоть до одного микрона с естественной зеркальной поверхностью. Благодаря большой нелинейной восприимчивости, наличию экситонного поглощения с довольно большой энергией связи ( $\sim 20$  meV) и большому разнообразию механизмов нелинейности показателя преломления и коэффициента поглощения

эти кристаллы в настоящее время широко используются в квантовой электронике [5–7].

В последнее время кристаллы GaSe являются также эффективным источником терагерцового лазерного излучения, занимающего промежуточное положение между диапазонами радио- и световых волн далекой инфракрасной области (100 GHz–10 THz) [8]. Благодаря сравнительно небольшому значению коэффициента поглощения ( $\alpha \sim 10^3$  cm $^{-1}$ ) по сравнению с другими полупроводниками (например,  $\alpha \sim 10^4$ – $10^5$  cm $^{-1}$  для Ge и Si) возможно более глубокое проникновение падающего излучения и образец, что позволяет создать на основе кристаллов GaSe и InSe высокоэффективные фотовольтаические преобразователи. Ширина запрещенных зон GaSe ( $E_g = 2.02$  eV) и InSe ( $E_g = 1.24$  eV) находится в области частот генерации лазеров, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Кроме того, весьма важным является наличие в этих кристаллах быстрого центра рекомбинации с большим сечением захвата ( $\sim 10^{-16}$  cm $^2$ ), что делает возможным регистрировать на их основе короткие лазерные импульсы [9].

Монокристаллы GaSe и InSe были выращены методом Бриджмена. Согласно холловским измерениям, удельное сопротивление, концентрация и подвижность носителей тока в направлении, параллельном оптической оси „с“, составляют:  $\rho = 0.8$ – $3$   $\Omega$ cm,  $n = 10^{16}$  cm $^{-3}$ ,  $\mu_n = 700$  cm $^2$ V $^{-1}$ s $^{-1}$  для  $n$ -InSe и  $\rho = 23$ – $30$   $\Omega$ cm,  $p = 10^{15}$  cm $^{-3}$ ,  $\mu_p = 20$ – $30$  cm $^2$ V $^{-1}$ s $^{-1}$  для  $p$ -GaSe. Пластины толщиной 15–80  $\mu$ m были изготовлены путем скалывания из крупных слитков. На свежесколотую поверхность образца методом термического испарения в вакууме был нанесен полупрозрачный слой из Pt, образующий с исследованными кристаллами барьер Шоттки. Толщина слоя Pt выбиралась таким образом, чтобы пропускание аналогичного слоя на стекле составляло 60–80%. Поверх слоя Pt наносилась золотая контакт-



**Рис. 1.** Спектры фоточувствительности структур Pt-*n*-InSe (а), Pt-*p*-GaSe (б); 1 — экспериментальные результаты, 2 — расчет.

ная гребенка, которая соединялась в цепь с помощью серебряной пасты. Тыльным омическим контактом служил In.

В качестве омического контакта также были использованы прозрачные слои In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Прозрачные и проводящие слои In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были получены испарением смеси порошка In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (90%) и индия (10%). Испарение проводилось под давлением кислорода ~ 8 · 10<sup>-5</sup> mmHg. Толщина слоя In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> была измерена с помощью интерференционного микроскопа и составляла 650–1200 Å. Слои In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> такой же толщины на стеклянной подложке обладали следующими транспортными параметрами: ρ = 0.2–7 Ωcm, n = (1–2.6) · 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>, μ = 4–12 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>.

В качестве источников излучения использовались YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазер (λ = 1060 nm) и лазер на красителе (PRA, LN-107) с перестраиваемой длиной волны (594–643) nm, накачка которого осуществлялась при помощи импульсного N<sub>2</sub>-лазера. С помощью линзы падающий лазерный луч фокусировался на поверхность образца с диаметром пятна ~ 1 mm. Максимальная мощ-

ность импульса составляла 12 MW/cm<sup>2</sup>, интенсивность варьировалась калиброванными нейтральными фильтрами. Падающий лазерный луч и приложенное электрическое поле были перпендикулярны поверхности слоев кристалла (параллельны оси „с“). Выход фотосигнала был подан в графический рекордер (HP-7475 A) через запоминающий осциллограф (Le-Croy 9400).

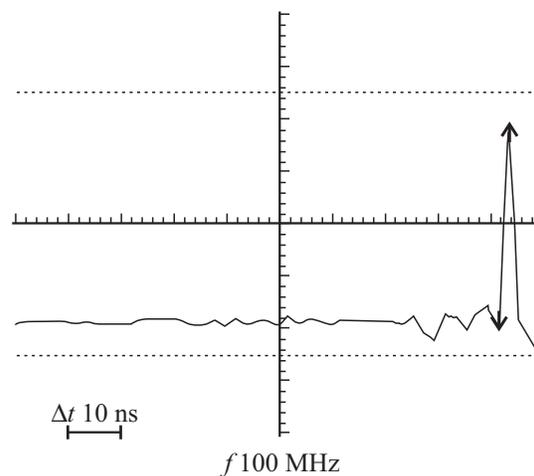
Спектры фоточувствительности структур Pt-*n*-InSe, Pt-*p*-GaSe при освещении со стороны полупрозрачного слоя представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, спектры фоточувствительности исследованных кристаллов охватывают широкий энергетический интервал (1.2–3.6 eV) от инфракрасной до ультрафиолетовой области спектра. В спектрах наблюдается экситонное поглощение с максимумами 1.25 и 2 eV для Pt-*n*-InSe и Pt-*p*-GaSe соответственно [10–13]. Сравнение экспериментальных кривых с теоретическими проводилось по формуле, приведенной в работе [14]

$$I = q\Phi_0 \left( 1 - l^{-\alpha W} + l^{-eW} \frac{\alpha L_n}{\alpha L_n + 1} \right),$$

где α — коэффициент поглощения, W — толщина слоя объемного заряда, L<sub>n</sub> — диффузионная длина неосновных носителей, Φ<sub>0</sub> — интенсивность падающего света. Установлено, что расчетные кривые согласуются с экспериментальными при W = 1.2, L<sub>n</sub> = 12 μm для InSe и W = 0.4, L<sub>n</sub> = 1.2 μm — для GaSe.

На рис. 2 приведена типичная осциллограмма одного из исследованных образцов Pt-*p*-GaSe. Как видно из рисунка, время нарастания и падения фотосигнала не превышает 10 ns, темновой ток — 6 · 10<sup>-6</sup> A при приложенном внешнем напряжении ~ 1 V. Чувствительность детекторов была равна 0.25 μA/μV при длине волны падающего излучения λ = 600 nm. Зависимость фототока от приложенного напряжения в интервале интенсивности 1.42–12 MW/cm<sup>2</sup> носит линейный характер вплоть до 30 V.

Сравнение детекторов Pt-*p*-GaSe и Pt-*n*-InSe, изготовленных с силиконовыми детекторами, используе-



**Рис. 2.** Осциллограмма структур Pt-*p*-GaSe.

мыми в настоящее время для регистрации лазерных импульсов, показало, что при одних и тех же экспериментальных условиях (длина волны, интенсивность, длительность лазерного излучения, величина нагрузочного сопротивления и приложенного напряжения) эти детекторы обладают почти одинаковыми характеристиками. Однако простой метод изготовления, отсутствие инжекции, простота структуры, высокая фоточувствительность в широком интервале энергий и наличие быстрого канала рекомбинации делает детекторы на основе кристаллов GaSe и InSe более предпочтительными.

## Список литературы

- [1] Агафонов В.Г., Валов П.М., Рывкин Б.С., Ярошецкий И.Д. // ФТП. 1973. Т. 7. Вып. 12. С. 2316–2325.
- [2] Moglestue C., Rosenzweig J., Kuhl J., Klingenstein M., Lambsdorff M., Axmann A., Schneider Jo., Hülsmann A. // Appl. Phys. 1991. Vol. 70. P. 2435–2448.
- [3] Rosenzweig J., Moglestue C., Axmann A. Proc. SPIE-INT. Soc. Opt. Eng. (USA). 1991. Vol. 1362. P. 168–173.
- [4] Chou S.Y., Liu Y., Khalil W., Hsiang T.Y., Alexandrou S. // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 61. P. 819–821.
- [5] Bidadi H., Kalafi M., Salmanov V. // Indian J. Phys. 68A. 1994. Vol. 6. P. 539–544.
- [6] Kalafi M., Bidadi H., Tajalli H., Salmanov V. // Opt. Mat. 1996. Vol. 6. P. 117–120.
- [7] Кязым-заде А.Г., Салманов В.М., Агаева А.А., Мурса-лов Э.Т. // Вестн. Бакинского ун-та. 1999. Вып. 3. С. 34–40.
- [8] Yujie J. Ding and Wei Shi. // J. Nonlinear Opt. Phys. and Mat. 2003. Vol. 12. № 4. P. 557–585.
- [9] Ахундов Г.А., Беленький Г.Л., Казиев Ф.Н., Салманов В.М., Агаева А.А. // Изв. вузов. Сер. Физика. 1972. Вып. 7. С. 127–128.
- [10] Andriyashik M.V., Sakhnosrii M.Y., Timofeev V.B., Yakimova A.S. // Phys. Stat. Sol. 1968. Vol. 28. P. 277–282.
- [11] Бакуменко В.Л., Ковалюк З.Д., Курбатов Л.Н., Чижко В.Ф. // ФТП. 1976. Т. 10. Вып. 6. С. 1045–1051.
- [12] Дворников Д.П., Салманов В.М., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. Вып. 1. С. 17–20.
- [13] Alekperov O.Z., Godjaev M.O., Zarbaliev M.Z. // Solid State Commun. 1991. Vol. 77. № 1. P. 65–67.
- [14] Segura A., Besson I.M., Chevy A., Martin M.S. // Nuovo Cimento. 1977. 38B. P. 345–350.