

07.3

## Повышение эффективности фотопьезоэлектрического индуцирования акустических волн в полуизолирующих монокристаллах арсенида галлия

© В.И. Митрохин<sup>1</sup>, Н.Н. Кривенко<sup>2</sup>, В.А. Логинов<sup>3</sup>, С.В. Железный<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Международный институт компьютерных технологий, Воронеж, Россия

<sup>3</sup> Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия

<sup>4</sup> Воронежский институт МВД России, Воронеж, Россия

E-mail: krivenko\_nadin@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 15 февраля 2022 г.

Принято к публикации 5 апреля 2022 г.

Проведен анализ влияния акустических потерь на эффективность индуцирования резонансных акустических волн в монокристаллических пластинах арсенида галлия с помощью световых импульсов инфракрасного диапазона. Установлено, что амплитуда возбуждаемых механических колебаний зависит от величины и положения на температурной шкале внутреннего трения в кристалле, обусловленного акустоэлектронной релаксацией. Сформулированы рекомендации по выбору элемента легирующей примеси арсенида галлия.

**Ключевые слова:** оптическое поглощение, пьезоэлектрический эффект, релаксация, оптические импульсы.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.10.52555.19167

В работе [1] описан эффект фотопьезоэлектрического индуцирования резонансных акустических волн в монокристаллических пластинах полуизолирующего арсенида галлия, не содержащего специально введенных примесей. В основе эффекта лежит преобразование энергии оптических импульсов с длиной волны собственного поглощения в полупроводнике в пульсирующую фотоэдс, которая посредством обратного пьезоэффекта порождает механические колебания пластины пьезоэлектрического среза. Если частота следования оптических импульсов близка к частоте резонансной моды (изгибной, продольной и др.) акустической волны в пластине, то будет иметь место параметрическое усиление амплитуды механических колебаний. Колеблущуюся пластину в этом случае можно рассматривать как полупроводниковый пьезоэлектрический резонатор с оптической накачкой, который может быть использован в качестве приемника оптических сигналов и обладает избирательностью по частоте модуляции оптического сигнала [2]. Дальнейшие исследования свойств такого резонатора показали, что его избирательные свойства, определяющиеся механической добротностью резонаторной пластины, зависят от таких внешних факторов, как потери в точках закрепления пластины, демпфирование окружающей средой, а также в решающей степени от внутреннего трения в полупроводниковом кристалле. Последняя составляющая потеря не может быть устранена конструктивными методами, так как определяется внутренними свойствами материала. В связи с этим были проведены исследования зависимости эффективности индуцирования резонансных механических колебаний в пластинах GaAs с наиболее часто используемыми

глубокими примесями Cr и Fe от внутреннего трения в интервале рабочих температур оптоэлектронных устройств.

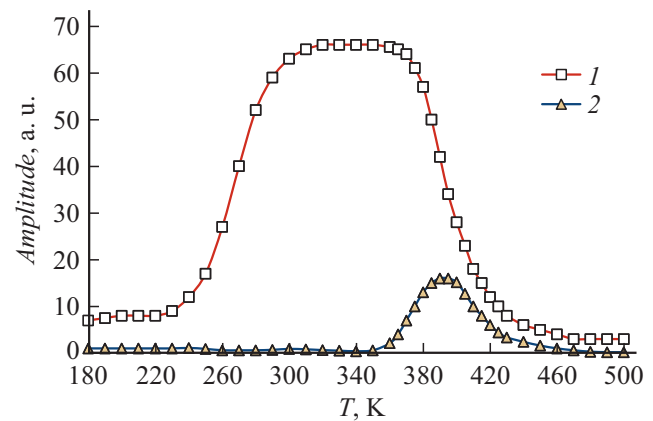
Амплитуда резонансных изгибных колебаний пластины GaAs под действием оптических импульсов и внутреннее трение определялись на одной установке для измерения внутреннего трения твердых тел [1] на одних и тех же образцах. Использовались пластины монокристаллического арсенида галлия, выращенного по методу Чохральского, легированные в расплаве примесями железа или хрома, обеспечивающими высокое удельное сопротивление ( $10^3$  и  $4 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{m}$  соответственно) за счет компенсации мелких фоновых примесей. Образцы прямоугольной формы размером  $18 \times 6 \times 0.4 \text{ mm}$  имели ориентацию плоскости  $\{100\}$  и направление длинной грани вдоль  $\langle 110 \rangle$ , при которых изгибная деформация вызывает пьезоэлектрические заряды в максимальном объеме. Пластины устанавливались в вакуумной камере горизонтально на двух кварцевых нитях толщиной  $50 \mu\text{m}$ , закрепленных на кварцевом основании с пленочными электродами, служащем емкостным датчиком. Точки опоры совпадали с узлами колебаний пластины. Импульсное оптическое облучение исследуемых образцов осуществлялось через прозрачное окно с помощью светодиода L-7113SF6C с длиной волны  $860 \text{ nm}$  и мощностью до  $100 \text{ mW}$ . Частота следования оптических импульсов выбиралась равной частоте первой изгибной моды. Колебания регистрировались с помощью емкостного датчика. Внутреннее трение измерялось по затуханию свободных колебаний с использованием электростатического возбуждения.

На рис. 1 показаны результаты измерения температурной зависимости амплитуды изгибных колебаний, индуцированных оптическими импульсами, в исследованных пластинах арсенида галлия.

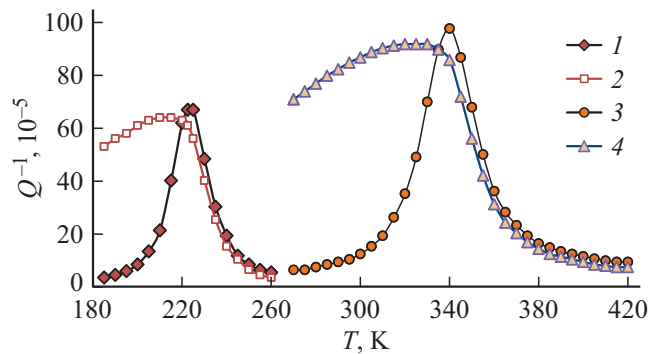
Из кривых на рис. 1 видно, что максимальная амплитуда колебаний пластины с примесью Fe (кривая 1) в 4 раза превышает амплитуду колебаний пластины с примесью Cr (кривая 2). Примесь Cr в GaAs создает более глубокий энергетический уровень (0.76 eV) в запрещенной зоне по сравнению с примесью Fe (0.52 eV) [3,4] и обеспечивает большие значения удельного сопротивления и оптической чувствительности полупроводника [5]. Кроме того, в высокоомных полупроводниках сильнее проявляется пьезоэлектрический эффект. Поэтому логично было предположить, что примесь Cr должна обеспечивать большую амплитуду колебаний по сравнению с примесью Fe. Однако наблюдается обратное соотношение (рис. 1). Объяснение этого кроется в результатах измерения температурной зависимости внутреннего трения в пластинах GaAs с указанными примесями (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что при отсутствии оптического облучения в образцах обоих типов имеются дебаевские пики внутреннего трения (кривые 1 и 3), которые обусловлены акустоэлектронной релаксацией свободных носителей заряда в переменном пьезоэлектрическом поле по типу максвелловской релаксации [6]. Их энергия активации близка к энергии ионизации соответствующего примесного уровня. При импульсном оптическом облучении с длиной волны 860 nm оба пика расширяются в низкотемпературной области (кривые 2 и 4), что является характерным для пиков данной природы. Такое расширение связано с возникновением спектра времен релаксации неравновесной проводимости вблизи области оптического поглощения в присутствии знакопеременного пьезоэлектрического поля изгибной деформации пластины, т. е. активированные излучением носители заряда становятся участниками релаксационного процесса наряду с равновесными свободными носителями. Парадоксальной особенностью описываемых процессов является то, что одни и те же неравновесные носители заряда, образующиеся вблизи облучаемой поверхности GaAs, индуцируют механические колебания пластины и одновременно их частично демпфируют в результате релаксационного перераспределения в переменном пьезоэлектрическом поле, порождаемом этими колебаниями. О степени демпфирования можно судить по изменению величины внутреннего трения  $Q^{-1}$ , обратного механической добротности пластины, которое увеличивается почти на два порядка: от значения  $Q^{-1} = 10^{-5}$  (фоновое значение) до  $Q^{-1} = 10^{-3}$  на максимуме релаксационных кривых. Это приводит к существенному ухудшению селективности приемников оптических сигналов, основанных на данном принципе.

Если сопоставить данные рис. 1 и 2, то можно отметить, что максимальная амплитуда колебаний пластин



**Рис. 1.** Температурная зависимость амплитуды изгибных колебаний с частотой 6.3 kHz, индуцированных оптическими импульсами, в пластинах GaAs с примесями Fe (1) и Cr (2).



**Рис. 2.** Температурная зависимость внутреннего трения  $Q^{-1}$  в пластинах GaAs с примесями Fe (1, 2) и Cr (3, 4). Кривые 1 и 3 получены на затемненных образцах, кривые 2 и 4 — при импульсном оптическом облучении с длиной волны 860 nm. Частота изгибных колебаний 6.3 kHz.

имеет место в том температурном интервале, где одновременно наблюдаются малые значения внутреннего трения и собственной проводимости. Высокотемпературный спад кривых 1 и 2 на рис. 1 происходит в одном интервале (выше 400 K) и связан с возрастанием собственной проводимости в GaAs [3], что вызывает экранирование фотоэдс. При этом уменьшение амплитуды возбуждаемых колебаний в низкотемпературной области кривых 1 и 2 на рис. 1 обусловлено демпфированием, связанным с наличием внутреннего трения. Примечательно, что в образцах GaAs(Fe) амплитуда возбуждаемых колебаний в интервале температур 280–350 K примерно в 100 раз больше, чем в образцах GaAs(Cr) (рис. 1), при равной интенсивности облучения, несмотря на то что примесь Cr обеспечивает удельное сопротивление и оптическую чувствительность на два порядка выше. Это является следствием того, что температурные области внутреннего трения и собственной проводимости для GaAs(Cr) перекрываются, а для GaAs(Fe) интервал между областями составляет более 100 K.

Таким образом, чем ниже на температурной шкале располагается область акустоэлектронного поглощения, тем выше амплитуда и шире температурный интервал возбуждаемых оптическими импульсами акустических колебаний. Это означает, что необходимо выбирать легирующую примесь в GaAs, имеющую область акустоэлектронного поглощения при более низкой температуре и одновременно обеспечивающую удовлетворительную оптическую чувствительность полупроводника. Интервал рабочих температур, в котором можно реализовать устройства, основанные на принципе фотопьезоэлектрического индуцирования акустических колебаний для GaAs(Fe), составляет 240–440 К (рис. 1), что практически соответствует температурному интервалу работы оптоэлектронных приборов.

Главный вывод, который можно сделать на основании полученных результатов, заключается в том, что эффективность фотопьезоэлектрического индуцирования акустических колебаний и частотная избирательность приемников оптических сигналов на основе описанного эффекта в большей степени зависят от демпфирующего влияния внутреннего трения, чем от удельного сопротивления и оптической чувствительности арсенида галлия.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] В.И. Митрохин, С.И. Рембеза, Р.Н. Антонов, ФТП, **45** (12), 1611 (2011). [V.I. Mitrokhin, S.I. Rembeza, R.N. Antonov, Semiconductors, **45** (12), 1550 (2011). DOI: 10.1134/S1063782611120098].
- [2] В.И. Митрохин, С.И. Рембеза, Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та, **7** (10), 9 (2011).
- [3] С.С. Хлудков, О.П. Толбанов, М.Д. Вилисова, И.А. Прудаев, *Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами* (Изд. дом Томск. гос. ун-та, Томск, 2016).
- [4] В.И. Фистуль, *Атомы легирующих примесей в полупроводниках* (Физматлит, М., 2004).
- [5] О.П. Толбанов, Электронная промышленность, № 1, 108 (2014).
- [6] С.Г. Алексеев, Ю.В. Гуляев, И.М. Котелянский, Г.Д. Мансфельд, УФН, **175** (8), 895 (2005). DOI: 10.3367/UFNr.0175.200508i.0895 [S.G. Alekseev, Yu.V. Gulyaev, I.M. Kotelyanskii, G.D. Mansfel'd, Phys. Usp., **48** (8), 855 (2005). DOI: 10.1070/PU2005v048n08ABEH002841].