



# УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ: ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

А. М. Григорьев<sup>1</sup>, [grigoriev@ltc.ru](mailto:grigoriev@ltc.ru), Е. В. Черкесова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Центр лазерных технологий,  
Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможностей визуализации воздействия внешних тепловых, электромагнитных и акустических полей на полупроводниковый материал излучением из спектрального диапазона края собственного поглощения материала.

## ВВЕДЕНИЕ

Существует множество способов визуализации различных физических полей. Температурное поле нагретого тела можно бесконтактно увидеть с помощью тепловизоров и ИК-камер. Контактные методы наблюдения тепловых полей основаны на применении разнообразных термочувствительных сред, например жидких кристаллов. Магнитные поля визуализируют посредством ферромагнитных порошков и жидкостей. Поля механических напряжений в прозрачных средах наблюдают с применением поляризованного света в скрещенных поляризаторах. Силовые линии электрического поля можно увидеть, применив взвесь электрополяризующегося порошка в вязком жидком диэлектрике, например эбонитовый порошок в касторовом масле.

Все перечисленные и другие способы визуального наблюдения физических полей основаны на различных принципах взаимодействия полей с визуализирующими средами или окружающим пространством. Однако в случае материалов, имеющих запрещенную зону, а это полупроводники, кристаллические диэлектрики и некоторые стекла, есть возможность визуально наблюдать различные поля внутри материала, основываясь на одном физическом эффекте. Это эффект изменения ширины запрещенной зоны и, соответственно, сдвига края собственного поглощения материала,

# SEE THE INVISIBLE: VISUALIZATION OF PHYSICAL FIELDS IN SEMICONDUCTOR MATERIALS

A. M. Grigoriev<sup>1</sup>, [grigoriev@ltc.ru](mailto:grigoriev@ltc.ru), E. V. Cherkesova<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Laser Technology Centre, St. Petersburg, Russia

This article deals with the results of theoretical and experimental studies of the possibilities of visualizing the effects of external thermal, electromagnetic and acoustic fields on a semiconductor material by radiation from the spectral range of the material's fundamental absorption edge.

## INTRODUCTION

There are many ways to visualize various physical fields. The temperature field of a heated body can be viewed contact-free with thermal imagers and IR cameras. The contact methods for observing thermal fields are based on the use of various heat-sensitive media, e.g., liquid crystals. Magnetic fields are visualized by means of ferromagnetic powders and liquids. Mechanical stress fields in transparent media are observed using polarized light in crossed polarizers. The electric field lines can be seen by applying a suspension of an electropolarizing powder in a viscous liquid dielectric, such as ebonite powder in castor oil.

All of the above and other methods of visual observation of physical fields are based on various principles of the interaction of fields with visualization media or the surrounding space. However, in the case of materials with a energy gap, such as semiconductors, crystalline dielectrics, and some glasses, it is possible to visually observe various fields inside the material, based on one physical effect. This is the effect of a change of the bandgap and, accordingly, a shift of the material's fundamental absorption edge, which is induced by a particular physical field. As a result of external influence of a thermal, mechanical, electric or magnetic field on a semiconductor material, its energy gap may increase or decrease. So, when heated, the gap increases, and under the conditions of compression of the material, e.g., influenced by hydrostatic pressure, the width of the gap decreases.



который индуцирован тем или иным физическим полем. В результате внешнего воздействия теплового, механического, электрического или магнитного поля на полупроводниковый материал его запрещенная зона может увеличиваться или уменьшаться. Так, при нагреве зона увеличивается, а в условиях сжатия материала, например, под действием гидростатического давления, ширина зоны уменьшается.

### ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Известно, что материалы, имеющие запрещенную зону, прозрачны для света, если энергия падающего фотона оказывается меньше ширины запрещенной зоны, и полностью поглощают свет, если энергия падающего фотона оказывается больше этой ширины. Спектральная область перехода от прозрачности к поглощению называется краем собственного или фундаментального поглощения материала. Коэффициент поглощения света материалом экспоненциально увеличивается, и этот процесс описывается формулой Урбаха [1]:

$$\alpha(E) \approx \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g - E}{E_U}\right).$$

Здесь:  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника,  $E$  – энергия фотона;  $E_U$  – параметр Урбаха;  $\alpha_0$  – коэффициент поглощения материала при  $E = E_g$ .

Если ширина запрещенной зоны  $E_g$  изменяется на некоторую величину  $\pm\Delta E_g$ , то это приводит к сдвигу края собственного поглощения в коротковолновую или длинноволновую область спектра, соответственно знаку изменения ширины зоны. Этот эффект смещения края можно использовать для визуального наблюдения результата различных внешних воздействий на материал: механических, акустических, тепловых, а также электрических и магнитных полей. Чтобы сформировать оптическое изображение результата внешнего воздействия, материал нужно просветить зондирующим пучком света с энергией фотона из спектральной области, где энергия фотона немного меньше ширины запрещенной зоны, и которую называют хвостом края поглощения.

Для света с фиксированной энергией фотона  $E_{ph}$  из спектральной области хвоста поглощения изменение коэффициента поглощения в условиях изменения величины зоны определяется соотношением, которое следует из формулы Урбаха [2]:

### PHYSICAL PRINCIPLE OF VISUALIZATION

It is known that materials with an energy gap are transparent to light if the energy of the incident photon is less than the width of the energy gap, and completely absorbs light if the energy of the incident photon turns out to be greater than this width. The spectral region of the transition from transparency to absorption is referred to as the fundamental absorption edge of the material. The coefficient of light absorption by the material increases exponentially, and this process is described by the Urbach formula [1]:

$$\alpha(E) \approx \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g - E}{E_U}\right),$$

where:  $E_g$  is the energy gap of a semiconductor,  $E$  is the photon energy;  $E_U$  is the Urbach parameter;  $\alpha_0$  is the material absorption coefficient at  $E = E_g$ .

If the energy gap  $E_g$  changes by a certain amount  $\pm\Delta E_g$ , then this leads to a shift of the intrinsic absorption edge to the short-wave or long-wave region of the spectrum, respectively, the sign of the change in the bandgap. This edge shift effect can be used to visually observe the result of various external influences on the material: mechanical, acoustic, thermal, as well as electric and magnetic fields. To form an optical image of the result of an external impact, the material needs to be illuminated with a probe beam of light with photon energy from the spectral region, where the photon energy is slightly less than the width of the energy gap and which is referred to as the tail of the absorption edge.

For light with a fixed photon energy,  $E_{ph}$  from the spectral region of the absorption tail, the change in the absorption coefficient under conditions of a change in the gap size is determined by the relation that follows from the Urbach formula [2]:

$$\alpha(E_{ph}) = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g \pm \Delta E_g - E_{ph}}{E_U}\right) = \alpha_{ph} \exp\left(-\frac{\pm E_g}{E_U}\right).$$

where:  $\alpha_{ph} = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g - E_{ph}}{E_U}\right)$  is the initial material absorption coefficient of light with photon energy  $E_{ph}$  (until the moment of the beginning of the impact).

In the case of an external impact on the material, leading to a decrease in the gap by the value  $-\Delta E_g$ , the absorption edge shifts to the left, to the long wavelength side of the spectrum. This shift causes a

$$\alpha(E_{ph}) = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g \pm \Delta E_g - E_{ph}}{E_U}\right) = \alpha_{ph} \exp\left(-\frac{\pm E_g}{E_U}\right).$$

Здесь:  $\alpha_{ph} = \alpha_0 \exp\left(-\frac{E_g - E_{ph}}{E_U}\right)$  – начальный коэффициент

поглощения материалом света с энергией фотона  $E_{ph}$  (до момента начала воздействия).

В случае внешнего воздействия на материал, приводящего к уменьшению зоны на величину  $-\Delta E_g$ , край поглощения смещается влево, в длинноволновую сторону спектра. Это смещение обуславливает значительное увеличение коэффициента поглощения света с энергией фотона  $E_{ph}$  и, соответственно, ослабление света, прошедшего сквозь материал. Если материал находится под воздействием, увеличивающим запрещенную зону  $+\Delta E_g$ , то край поглощения сдвигается вправо, в сторону коротких волн. В процессе сдвига края коэффициент поглощения света с энергией фотона  $E_{ph}$  значительно уменьшается, материал просветляется пропорционально степени внешнего воздействия, и количество света, прошедшего сквозь материал, увеличивается. Эта ситуация схематически изображена на рис. 1. Зеленая кривая – это край поглощения до внешнего воздействия, а красная и синяя кривые изображают длинноволновый и коротковолновый сдвиг края соответственно, энергии фотона  $E_{ph}$  отмечена желтым пунктиром.

Поскольку разные внешние воздействия на материал с запрещенной зоной вызывают разнонаправленный сдвиг края собственного поглощения, то целесообразно рассматривать вопрос визуализации, разделив внешние воздействия на два типа. Первый тип индуцирует увеличение запрещенной зоны материала и сдвиг края в длинноволновую сторону спектра, а второй тип вызывает уменьшение зоны и сдвиг края в коротковолновую сторону.

### ДЛИННОВОЛНОВЫЙ СДВИГ

Нагрев полупроводникового материала или воздействие электрического поля вызывают уменьшение ширины запрещенной зоны, которое пропорционально изменению температуры материала или напряженности поля соответственно.

В случае нагрева полупроводникового материала, исходно находящегося при нормальных условиях (температура 20 °C и атмосферное давление  $\sim 10^5$  Па), сокращение зоны прямо пропорционально увеличению температуры:

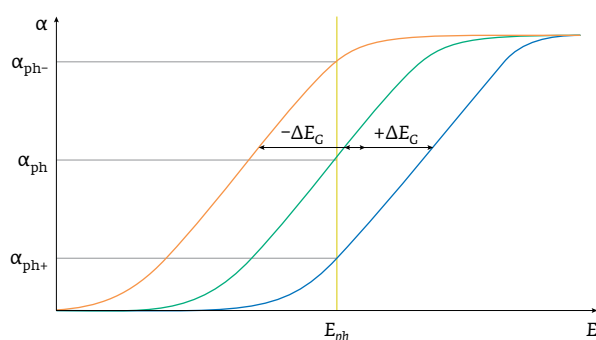
significant increase in the absorption coefficient of light with the photon energy  $E_{ph}$  and, accordingly, the attenuation of light passing through the material. If the material is under the influence of increasing the energy gap  $+\Delta E_g$ , then the absorption edge shifts to the right in the direction of short waves. During the edge shift process, the absorption coefficient of light with a photon energy  $E_{ph}$  is significantly reduced, the material becomes clear in proportion to the degree of external influence, and the amount of light passing through the material increases. This situation is shown schematically in Figure 1. The green curve is the absorption edge before external influence, and the red and blue curves represent the long-wavelength and short-wavelength shift of the edge, respectively, the photon energy  $E_{ph}$  is denoted with a yellow dotted line.

Since different external influences on a material with an energy gap cause a multidirectional shift of its own absorption edge, it is advisable to consider the issue of visualization, dividing external influences into two types. The first type induces an increase in the energy gap material and the edge shift to the long-wave side of the spectrum, and the second type causes a decrease in the gap and a shift of the edge to the short-wave side.

### LONG-WAVELENGTH SHIFT

Heating a semiconductor material or an electric field causes a decrease in the energy gap, which is proportional to the change in material temperature or field strength, respectively.

In the case of heating a semiconductor material initially under normal conditions (temperature 20 °C and atmospheric pressure  $\sim 10^5$  Pa), the reduction of



**Рис. 1.** Разнонаправленный сдвиг края поглощения полупроводника в результате различных внешних воздействий  
**Fig. 1.** Multidirectional shift of the absorption edge of a semiconductor as a result of various external influences

$$\Delta E_g(T) = \frac{\xi T^2}{(T+B)} \approx -\xi \Delta T.$$

Здесь:  $\xi$  – коэффициент температурного изменения зоны,  $\Delta T$  – изменение температуры материала в результате нагрева.

Для статического электрического поля изменение зоны можно оценить, используя соотношение, приведенное в работе [3]:

$$\Delta E_g(E_{el}) = - \left( \frac{(eE_{el})^2 \hbar}{m_{ef}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Здесь:  $e$  – заряд электрона,  $E_{el}$  – напряженность электрического поля,  $m_{ef}$  – эффективная масса электрона.

В работе [4] показано, что соотношение, связывающее изменение зоны с напряженностью поля, справедливо и в случае переменного электрического поля, в том числе поля световой волны, при условии, что энергия фотона много меньше ширины зоны. В этом случае изменение зоны связано с интенсивностью световой волны следующим соотношением [3]:

$$\Delta E_g(I) = - \left( \frac{2Ie\hbar}{n\epsilon_0 m_{ef}} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где  $I$  – интенсивность световой волны;  $n$  – показатель преломления материала.

### КОРОТКОВОЛНОВЫЙ СДВИГ

Увеличение ширины запрещенной зоны и сдвиг края поглощения полупроводникового материала в длинноволновую сторону спектра наблюдается в случае воздействия на материал с полупроводниковыми свойствами гидростатического давления, механическими сжимающими напряжениями и магнитным полем; в случае механических сжимающих напряжений изменение запрещенной зоны прямо пропорционально величине давления:

$$\Delta E_g(P) = \nu P.$$

Здесь:  $\nu$  – коэффициент, связывающий изменение зоны с величиной давления, приложенной к материалу,  $P$  – давление.

Изменение запрещенной зоны полупроводника, находящегося в магнитном поле (где  $B$  –

the gap is directly proportional to the increase in temperature:

$$\Delta E_g(T) = \frac{\xi T^2}{(T+B)} \approx -\xi \Delta T,$$

where:  $\xi$  is the coefficient of temperature change of the gap,  $\Delta T$  is the change in the temperature of the material as a result of heating.

For a static electric field, the gap change can be estimated using the relation given in [3]:

$$\Delta E_g(E_{el}) = - \left( \frac{(eE_{el})^2 \hbar}{m_{ef}} \right)^{\frac{1}{3}},$$

where:  $e$  is the electron charge,  $E_{el}$  is the electric field strength,  $m_{ef}$  is the effective electron mass.

It was shown in [4] that the relation connecting the change in the gap with the field strength is also valid in the case of an alternating electric field, including the field of the light wave, provided that the photon energy is much less than the width of the gap. In this case, the change in the gap is associated with the intensity of the light wave by the following relation [3]:

$$\Delta E_g(I) = - \left( \frac{2Ie\hbar}{n\epsilon_0 m_{ef}} \right)^{\frac{1}{3}},$$

where  $I$  is the intensity of the light wave;  $n$  is the refractive index of the material.

### SHORT-WAVELENGTH SHIFT

An increase in the energy gap and a shift of the absorption edge of a semiconductor material to the long-wavelength side of the spectrum is observed when a material with semiconductor properties is affected by hydrostatic pressure, mechanical compressive stresses and a magnetic field; in the case of mechanical compressive stresses, the change in the energy gap is directly proportional to the pressure:

$$\Delta E_g(P) = \nu P,$$

where:  $\nu$  is the coefficient associating the change in the gap with the amount of pressure applied to the material,  $P$  is the pressure.

The change in the semiconductor bandgap, which is in a magnetic field (where  $B$  is the value of magnetic induction), is described by the formula:

$$\Delta E_g(B) = \frac{Be\hbar}{2m_{ef}}.$$





величина магнитной индукции), описывается формулой:

$$\Delta E_g(B) = \frac{Be\hbar}{2m_{ef}}$$

В обоих случаях внешнего воздействия на полупроводник давления, сжимающих напряжений или магнитного поля запрещенная зона увеличивается, а край поглощения смещается в коротковолновую сторону спектра.

### ПРИМЕРЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ МАТЕРИАЛ

Способ визуализации результата внешних воздействий в обоих случаях сдвига края базируется на просвечивании материала зондирующим пучком света с равномерным распределением интенсивности в поперечном сечении пучка и длиной волны из спектральной области хвоста поглощения. В случае локального или неравномерного в пространстве любого из перечисленных выше внешних воздействий световой пучок, пройдя сквозь материал, приобретет амплитудный рельеф, соответствующий пространственному распределению степени воздействия на материал. В этом случае линзовой или зеркальной оптикой можно сформировать световое изображение результата внешнего воздействия на материал. Очевидно, что изображения, полученные в результате противоположных сдвигов края, будут соотноситься друг с другом как позитив и негатив.

Верификация предложенного физического принципа визуализации различных внешних воздействий на полупроводниковый материал была выполнена на образцах арсенида галлия, которые подвергались тепловому и акустическому воздействию. Эти типы воздействия выбраны потому, что вызывают разнонаправленный сдвиг края собственного поглощения полупроводникового материала. Сдвиг края в поле мощной световой волны подробно исследован в работе [4].

Локальное тепловое воздействие на полупроводниковую пластину производилось за счет поглощения импульса излучения CO<sub>2</sub>-лазера. Пластина была выполнена из арсенида галлия n-типа с концентрацией свободных носителей 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>. Лазерный импульс длительностью 80 мкс фокусировался на поверхности пластины в пятно диаметром примерно 1,5 мм и поглощался свободными носителями, что обеспечивало локальный нагрев области образца с поперечным размером, соответствующим диаметру пятна лазерного излуче-

In both cases, the external influence on the semiconductor of pressure, compressive stress or magnetic field increases the energy gap, and the absorption edge shifts to the short-wavelength side of the spectrum.

### EXAMPLES OF VISUALIZATION OF EXTERNAL INFLUENCES ON SEMICONDUCTOR MATERIAL

The method of visualizing the result of external influences in both cases of the edge shift is based on the transmission of the material by the probing light beam with a uniform intensity distribution in the beam cross section and the wavelength from the spectral region of the absorption tail. In the case of local or non-uniform in space of any of the external effects listed above, a light beam passing through the material will acquire an amplitude relief corresponding to the spatial distribution of the degree of impact on the material. In this case, lens or mirror optics can be used to form a light image of the result of an external impact on the material. It is obvious that images obtained as a result of opposite edge shifts will be related to each other as positive and negative.

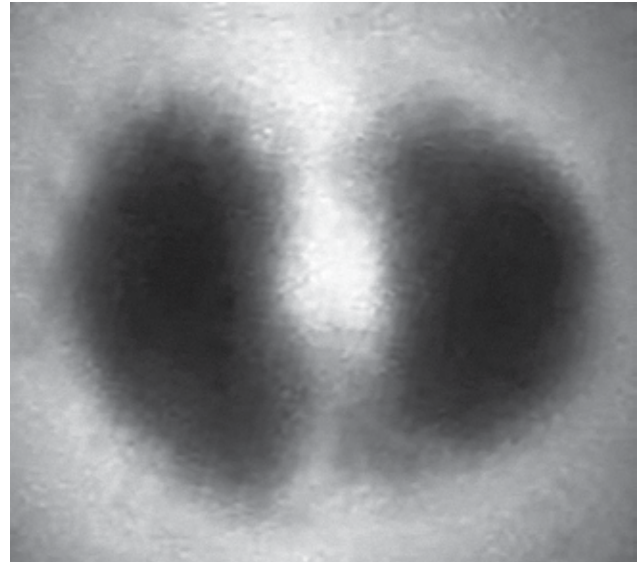
The verification of the proposed physical principle of visualization of various external influences on the semiconductor material was performed on samples of gallium arsenide, which were subjected to thermal and acoustic effects. These types of effects are chosen because they cause a multidirectional shift of the self-absorption edge of the semiconductor material. The edge shift in the field of a powerful light wave was studied in detail in [4].

The local thermal effect on the semiconductor wafer was made due to the absorption of a CO<sub>2</sub> laser radiation pulse. The plate was made of n-type gallium arsenide with a concentration of free carriers of 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>. A laser pulse with a duration of 80 μs was focused on the surface of the plate into a spot with a diameter of about 1.5 mm and was absorbed by free carriers, which provided local heating of the sample area with a transverse size corresponding to the diameter of the laser spot. At the moment of the end of the heating laser pulse, the plate was transilluminated by a beam of radiation from a semiconductor pulsed laser LPI-14 with a wavelength of 905 nm, which corresponds to the edge of the intrinsic absorption of gallium arsenide at room temperature. The pulse duration of a semiconductor laser had a value of ~100 ns. As a result of local heating, the absorption edge of gallium arsenide shifted to the long-wavelength side of the spectrum and the transmission beam, which initially had a uniform intensity distribution after passing through the plate, acquired a negative

ния. В момент окончания нагревающего лазерного импульса пластина просвечивалась пучком излучения полупроводникового импульсного лазера ЛПИ-14 с длиной волны 905 нм, что соответствует краю собственного поглощения арсенида галлия при комнатной температуре. Длительность импульса полупроводникового лазера имела величину ~100 нс. В результате локального нагрева край поглощения арсенида галлия сдвигался в длинноволновую сторону спектра и просвечивающий пучок, исходно имевший равномерное распределение интенсивности после прохождения сквозь пластину, приобретал отрицательный амплитудный рельеф, соответствующий распределению тепла в образце. Далее линзовым объективом с фокусным расстоянием 50 мм изображение локального нагрева пластины формировалось на матрице CCD-камеры. Это изображение представлено на рис. 2.

Следует отметить, что изображение нагрева повторяет распределение интенсивности излучения  $\text{CO}_2$ -лазера – мода  $\text{TEM}_{01}$ .

В качестве примера визуализации воздействия, увеличивающего запрещенную зону полупроводникового материала, была выбрана акустическая волна, которая индуцировалась путем воз-



**Рис. 2.** Изображение локального нагрева  
*Fig. 2. Local heating image*

amplitude relief corresponding to the heat distribution in the sample. Further, with a lens with a focal length of 50 mm was used to form an image of local heating of the plate on the matrix of a CCD camera (Fig. 2).

действия на образец сфокусированного импульса излучения неодимового лазера длительностью 12 наносекунд. Импульс частично поглощался материалом образца, что вызывало генерацию акустической волны. С временной задержкой в несколько микросекунд пластина просвечивалась импульсом зондирующего излучения с параметрами, идентичными случаю визуализации теплового воздействия. В области максимумов акустической волны материал пластины сжимался, что приводило к сдвигу края поглощения в коротковолновую сторону спектра и уменьшению поглощения на длине волны просвечивающего излучения, которое после прохождения сквозь пластину приобретало положительный амплитудный рельеф. Как и в предыдущем случае, изображение воздействия формировалось линзовым объективом и регистрировалось CCD камерой. На рис. 3 представлено изображение акустической волны, индуцированной в пластине из арсенида галлия импульсом излучения неодимового лазера.

Как и ожидалось, изображения теплового и акустического воздействий соотносятся как негатив и позитив, что объясняется разнонаправленным сдвигом края собственного поглощения материала образца.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сдвиг края собственного поглощения материала, имеющего запрещенную зону, позволяет визуализировать различные по своей физической природе внешние воздействия на материал, что дает возможность решить весьма широкий спектр технических задач.

Так, применительно к лазерной технике на основе визуализации теплового поля, индуцированного лазерным излучением, проходящим сквозь пластину полупроводникового материала, например, GaAs, ZnSe или ZnS, можно создать проходные измерители мощности и энергии лазерного излучения высокой интенсивности. Также можно реализовать оптические датчики различных физических величин. Например, применяя оптоволоконную доставку просвечивающего излучения к малоразмерному полупроводниковому чувствительному элементу, можно делать оптоволоконные твердотельные датчики давления, температуры, а также напряженности электрического и магнитного полей.

Визуализация внешних воздействий может быть применена для измерения физических параметров полупроводниковых материалов. Регистрируя последовательно во времени изображения



Рис. 3. Изображение акустической волны  
Fig. 3. Acoustic wave image

It should be noted that the heating image repeats the distribution of the intensity of the CO<sub>2</sub>-laser radiation – the TEM<sub>01</sub> mode.

As an example of visualization of the impact, increasing the area of the semiconductor material, an acoustic wave was chosen, which was induced by exposing the sample to a focused pulse of a neodymium laser with a duration of 12 nanoseconds. The pulse was partially absorbed by the sample material, which caused the generation of an acoustic wave. With a delay of several microseconds, the plate was transilluminated by a probe radiation pulse with parameters identical to the case of visualization of thermal exposure. In the region of the maxima of the acoustic wave, the plate material was compressed, which led to the shift of the absorption edge to the short-wave side of the spectrum and a decrease in absorption at the wavelength of the transmission radiation, which after passing through the plate acquired a positive amplitude relief. As in the previous case, the image of the impact was formed by a lens and recorded with a CCD camera. Fig. 3 shows an image of an acoustic wave induced in a gallium arsenide plate by a pulse of a neodymium laser.

As expected, the images of thermal and acoustic effects are correlated as negative and positive, which is explained by the multidirectional shift of the edge of the intrinsic absorption of the sample material.

### CONCLUSION

Shifting the edges of the intrinsic absorption of a material that has an energy gap allows visualization of



тепла или акустической волны, распространяющихся в материале, можно определять тепловые и акустические параметры материала: коэффициент теплопроводности или скорость волны соответственно. Кроме этого, метод визуализации может быть полезен для исследования напряженного состояния полупроводниковых материалов, например, электронных чипов в процессе их работы.

Таким образом, предложенный метод визуализации различных внешних воздействий на материалы с полупроводниковыми свойствами может быть весьма полезен на практике.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Urbach F.** The long-wavelength edge of photographic sensitivity and electronic absorption of solids. *Phys. Rev.* 1953; 92: 1324–1326.
2. **Grigorev A.** Direct optical imaging of structural inhomogeneities in crystalline materials. *Appl. Opt.* 2016; 55: 3866–3872.
3. **Келдыш Л. В.** О влиянии сильного электрического поля на оптические характеристики непроводящих кристаллов. *ЖЭТФ.* 1958; 34: 1138–1141.  
**Keldysh L. V.** O vliyaniy sil'nogo ehlektricheskogo polya na opticheskie harakteristiki neprovodyashchih kristallov. *ZHEHTF.* 1958; 34: 1138–1141.
4. **Григорьев А. М.** О возможности применения динамического эффекта Келдыша-Франца для регистрации параметров излучения мощных ИК-лазеров. *Квантовая электроника.* 2011; 41: 479–482.  
**Grigor'ev A. M.** O vozmozhnosti primeneniya dinamicheskogo ehffekta Keldysha-Franca dlya registracii parametrov izlucheniya moshchnyh IK-lazerov. *Kvantovaya ehlektronika.* 2011; 41: 479–482.

various external effects on the material, which makes it possible to solve a very wide range of technical problems.

Thus, with reference to laser technology, based on the visualization of a thermal field induced by laser radiation passing through a plate of a semiconductor material, such as GaAs, ZnSe or ZnS, you can create pass-through meters of high-intensity laser energy. It is also possible to realize optical sensors of various physical quantities. Also, applying fiber-optic delivery of translucent radiation to a small-sized semiconductor sensitive element, you can make fiber-optic solid-state pressure, temperature, and electric and magnetic fields.

Visualization of external influences can be applied to measure the physical parameters of semiconductor materials. By successively recording the images of heat or acoustic wave propagating in the material, it is possible to determine the thermal and acoustic parameters of the material: thermal conductivity coefficient or wave velocity, respectively. Furthermore, the imaging method can be useful for studying the stress state of semiconductor materials, e. g., electronic chips in the course of their work.

Thus, the proposed method of visualization of various external influences on materials with semiconductor properties can be very useful in practice.