

Фотопьезоэлектрическое индуцирование резонансных акустических волн в монокристаллах полуизолирующего арсенида галлия

© В.И. Митрохин[¶], С.И. Рембеза, Р.Н. Антонов

Воронежский государственный технический университет,
394026 Воронеж, Россия

(Получена 17 мая 2011 г. Принята к печати 24 мая 2011 г.)

В монокристаллах полуизолирующего арсенида галлия исследован эффект возбуждения резонансных акустических волн при помощи световых импульсов. Максимум амплитуды возбуждаемых упругих колебаний наблюдался в температурном интервале, где одновременно имеют место малые значения внутреннего трения и электропроводности полупроводника. Эффект связан с обратным пьезоэлектрическим преобразованием энергии объемной фотоэдс в механическую деформацию полупроводникового кристалла. Результаты исследований могут быть использованы для создания полупроводниковых фотоприемников с высокой селективностью по частоте модуляции.

1. Введение

Для диагностики твердых тел достаточно широко используют фотоакустический эффект, при котором импульсное оптическое облучение вызывает локальный разогрев приповерхностной области тела и за счет термоупругой деформации материала порождает в нем акустическую и тепловую волны [1–4]. В качестве источников возбуждающих импульсов, как правило, применяют лазеры или электронные пучки, обеспечивающие высокую плотность излучения, достаточную для заметного локального разогрева поверхности образца. Преобразование возбуждаемой акустической волны в электрический сигнал осуществляют обычно с помощью дополнительного пьезоэлектрического датчика, прикрепляемого к изучаемому объекту. Как известно, нагрев полупроводников может приводить к существенному изменению их физических свойств. Поэтому использование тепловых волн может вызывать трудности в интерпретации результатов, а при некоторых пороговых уровнях облучения вызывать нежелательные процессы, например диффузионные. Лазерная пьезогенерация звука [5], которая на порядок эффективней термоупругой, также требует высокой плотности оптического излучения при сверхкоротких импульсах и используется в основном для исследования процессов в нелинейной акустике.

Для изучения полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ и т.д., обладающих пьезоэлектрическими свойствами, более перспективным по сравнению с фотоакустическим эффектом представляется использование резонансного фотопьезоэлектрического способа преобразования энергии оптических импульсов в упругие колебания образца. Впервые такой способ возбуждения акустических волн описали авторы работы [6]. На примере монокристаллических пластин полуизолирующего GaAs, легированного Cr, было показано, что объемная фотоэдс, возникающая при оптическом облучении пьезоэлектрического кристалла в направлении его электриче-

ской оси, может породить механическую деформацию облучаемой пластины за счет обратного пьезоэлектрического эффекта. При совпадении частоты следования оптических импульсов с частотой механического резонанса пластины происходит резонансное усиление амплитуды деформации и колебания пластины можно надежно регистрировать даже без усиления сигнала.

Проведенные нами эксперименты показали, что фотопьезоэлектрический способ возбуждения резонансных акустических волн в высокоомных пьезоэлектрических кристаллах требует примерно в 100 раз меньшую плотность оптического излучения, чем классический фотоакустический метод [1–4], а источником излучения может служить светодиод мощностью в несколько мВт. Целью настоящей работы было детальное изучение природы эффекта фотопьезоэлектрического индуцирования упругих волн в полуизолирующих монокристаллах GaAs, не содержащих специально введенных глубоких примесей. По результатам работы определены области возможного практического использования данного явления.

2. Образцы и методика исследований

В экспериментах использовались монокристаллические пластины полуизолирующего GaAs, выращенного методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава (метод LEC) и не содержащего специально введенных глубоких примесей (изготовитель пластин — ООО „ГИРМЕТ“, Москва). Принято считать, что в таком материале роль компенсирующих центров выполняют собственные структурные дефекты типа EL [7]. Кристаллы характеризовались удельным сопротивлением $\sim 10^7$ Ом·см, коэффициентом оптического поглощения при длине волны 10.6 мкм $< 10^{-2}$ см $^{-1}$ и подвижностью электронов и дырок соответственно ~ 2000 и ~ 200 см 2 /(В·с).

Исследуемые образцы вырезались из пластин с ориентацией поверхности {100}, толщиной 0.4 мм в форме

[¶] E-mail: mitro4@yandex.ru

параллелепипедов длиной 20 мм и шириной 5 мм. Длинная грань образца имела направление $\langle 110 \rangle$. При такой ориентации пластины объемная фотоэдс (эдс Дембера), возникающая при оптическом облучении в направлении, перпендикулярном плоскости пластины, вызывает наибольшую величину изгибной деформации [6,8].

Эксперименты проводились с использованием установки для измерения внутреннего трения, описанной в [9]. Измеряемые пластины устанавливались в затемненной вакуумной камере горизонтально на две кварцевые опоры в точках узлов собственных изгибных колебаний, и через окно из кварцевого стекла направлялось модулированное излучение от инфракрасного светодиода типа L53SF6C (длина волны 860 нм). Изгибные колебания исследуемой пластины в килогерцовом диапазоне частот регистрировались с помощью емкостного датчика в интервале температур 180–580 К по методу частотной модуляции–демодуляции сигнала. Частота следования световых импульсов выбиралась равной резонансной частоте основной моды изгибных колебаний образца.

3. Результаты и их обсуждение

Несмотря на малые значения объемной фотоэдс, возникающей в пластине полуизолирующего GaAs при межзонном оптическом поглощении, благодаря резонансной методике удалось зарегистрировать заметные изгибные колебания образца, порождаемые оптическим облучением, и измерить температурную зависимость их амплитуды, которая показана на рис. 1.

Видно, что при температурах выше 300 К наблюдается резкий рост амплитуды колебаний и отчетливо выраженный максимум в температурном интервале 320–420 К.

С целью выявления природы данного максимума для этой же пластины GaAs были измерены температурные зависимости внутреннего трения Q^{-1} и удельной электропроводности σ (рис. 2).

Формирование максимума, показанного на рис. 1, может быть результатом наложения нескольких процессов, влияющих на амплитуду возбуждаемых механических колебаний. Сопоставление кривых на рис. 1 и 2 показывает, что максимум располагается в том же температурном интервале, где одновременно наблюдаются малые значения внутреннего трения и электропроводности образца. При температурах выше максимума существенно возрастает проводимость образца (рис. 2, кривая 3) вследствие термической активации компенсирующих глубоких центров. Это вызывает экранирование фотоэдс и, как следствие, уменьшение амплитуды изгибных колебаний пластины. Образование низкотемпературной ветви максимума изгибных колебаний по видимому, является результатом демпфирования возбуждаемых световыми импульсами механических колебаний за счет возрастания внутреннего трения образца при

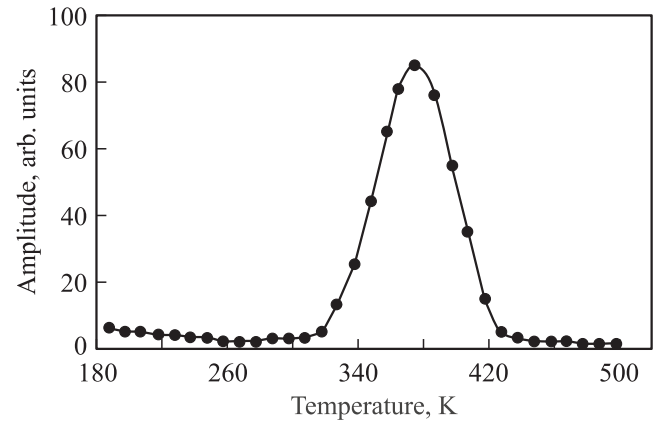


Рис. 1. Температурная зависимость амплитуды резонансных изгибных колебаний пластины GaAs на частоте 5.7 кГц, индуцированных импульсным оптическим излучением с длиной волны 860 нм.

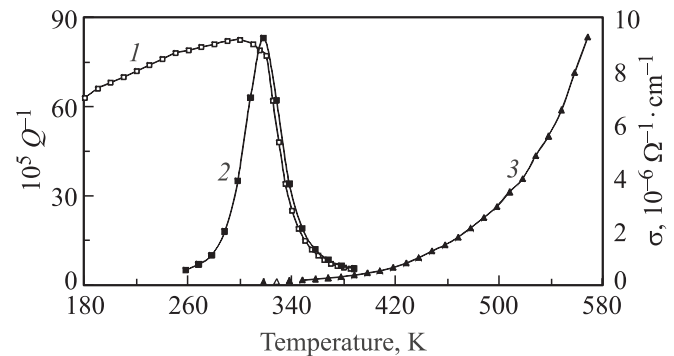


Рис. 2. Температурные зависимости внутреннего трения Q^{-1} пластины GaAs при импульсном оптическом облучении с длиной волны 860 нм (1), в условиях затемнения образца (2) и электропроводности σ (3).

температурах ниже 400 К (рис. 2, кривая 1). При отсутствии оптического облучения (затемненный образец) наблюдается дебаевский пик внутреннего трения вблизи температуры 320 К (рис. 2, кривая 2). Природа пиков подобного рода в полуизолирующих полупроводниках $A^{III}B^V$ подробно изучена авторами работы [8]. Предполагается, что внутреннее трение данного типа обусловлено релаксационным перераспределением носителей заряда в знакопеременном пьезоэлектрическом поле, индуцированном изгибной деформацией пластины. Значительное расширение исходного „темнового“ дебаевского пика внутреннего трения в низкотемпературную область при оптическом облучении образца (рис. 2, кривая 1) можно объяснить наличием спектра времен электронной релаксации в условиях градиента концентрации неравновесных носителей заряда по глубине пластины.

Эффективность импульсного оптического возбуждения упругих колебаний оказалась сильно зависящей от кристаллографической ориентации пластин GaAs. Были исследованы образцы с различными кристаллографиче-

Сравнительные данные относительной амплитуды индуцируемых световыми импульсами изгибных колебаний и вектора пьезополяризации $P_h/P_{h\max}$ в пластинах GaAs различной кристаллографической ориентации

Ориентация плоскости пластины	Направление длинной оси образца	Относительная величина вектора пьезополяризации $P_h/P_{h\max}$	Относительная амплитуда изгибных колебаний пластины, Å
{100}	$\langle 100 \rangle$	0	0
	$\langle 110 \rangle$	1	1
{110}	$\langle 100 \rangle$	0	0
	$\langle 110 \rangle$	0	0
	$\langle 111 \rangle$	0	0
{111}	$\langle 110 \rangle$	0.33	0.4 ± 0.05

Примечание. P_h — модуль вектора пьезополяризации в направлении, перпендикулярном плоскости изгиба; $P_{h\max}$ — максимальный модуль вектора при ориентации образца {100}, {110}.

скими ориентациями плоскости наибольшей грани, а также с различными направлениями длинной оси пластины. Измерения проводились на образцах следующих ориентаций: {100}, $\langle 100 \rangle$; {100}, $\langle 110 \rangle$; {110}, $\langle 100 \rangle$; {110}, $\langle 110 \rangle$; {110}, $\langle 111 \rangle$; {111}, $\langle 110 \rangle$.

Заметные изгибные колебания пластины при возбуждении световыми импульсами удалось зарегистрировать только в образцах двух ориентаций: {100}, $\langle 110 \rangle$ и {111}, $\langle 110 \rangle$.

Наблюдается корреляция полученных данных с результатами расчета пьезоэлектрической поляризации, возникающей при изгибе пластин GaAs различной кристаллографической ориентации [8]. Результаты сведены в таблицу.

Из таблицы видно, что импульсное оптическое возбуждение изгибных колебаний наблюдается в случаях, при которых изгиб вызывает объемные пьезоэлектрические заряды (ориентации {100}, $\langle 110 \rangle$ и {111}, $\langle 110 \rangle$). В случае остальных ориентаций изгиб пластины приводит лишь к краевым эффектам, и пьезоэлектрические заряды локализуются вблизи торцевых граней [8]. Для пластины с ориентацией {100}, $\langle 110 \rangle$ (при которой наблюдается максимальная амплитуда возбуждаемых колебаний) вектор пьезополяризации P_h направлен перпендикулярно плоскости пластины, и пьезоэлектрическое поле пронизывает почти весь объем пластины [8] (рис. 3).

Если оптическое облучение пластины осуществлять в направлении, перпендикулярном ее плоскости, то вектор электрической напряженности поля Дембера будет совпадать с направлением вектора пьезополяризации P_h . Возникающее демберовское поле будет вызывать изгибную деформацию пластины посредством обратного пьезоэлектрического эффекта. Амплитуда возбуждаемых изгибных колебаний (при прочих равных условиях) будет зависеть не только от кристаллографической ориентации образца, но и от распределения фотоэдс по его

толщине. Далее приведены оценочные расчеты распределения напряженности демберовского поля по глубине пластины полуизолирующего GaAs и вызываемой этим полем деформации изгиба образца.

Известно, что при оптическом облучении GaAs межзонное поглощение происходит в тонком приповерхностном слое (~ 1 мкм) [7] с образованием неравновесных электронно-дырочных пар. Большая разница в подвижности электронов и дырок в полуизолирующем GaAs (~ 2000 и ~ 200 см²/(В·с) соответственно) вызывает диффузионное разделение неравновесных носителей заряда, создает объемный заряд и демберовское поле на глубину порядка диффузионной длины.

Значение диффузионной длины неравновесных носителей заряда L для образцов нелегированного полуизолирующего GaAs было рассчитано из измерений постоянной времени релаксации собственной фотопроводимости и составило величину $L \approx 220$ мкм. Это значение соизмеримо с толщиной монокристаллической пластины 400 мкм. Поэтому часть генерируемых светом неравновесных электронов будет достигать темной стороны пластины, что приводит к возникновению на этой поверхности нескомпенсированных отрицательных зарядов. Соответственно на облучаемой стороне будет наблюдаться избыток положительных зарядов. Такое распределение зарядов было подтверждено измерениями стационарной фотоэдс исследуемых пластин GaAs.

Измерить величину напряженности поля Дембера в объеме пластины GaAs практически не представляется возможным, так как демберовское напряжение компенсируется разностью потенциалов на контактах [10]. Однако, вычислив величину объемной фотоэдс на глубине, равной диффузионной длине L , можно рассчитать распределение напряженности поля Дембера по глубине пластины.

Величина эдс Дембера для однородного образца GaAs, освещаемого перпендикулярно поверхности, равна [9]

$$U_D = \int_0^z E dz = \frac{kT}{E} \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p} \ln(\sigma_0/\sigma_1). \quad (1)$$

Здесь E — напряженность поля Дембера, μ_n, μ_p — подвижности электронов и дырок, σ_0, σ_1 — проводимость

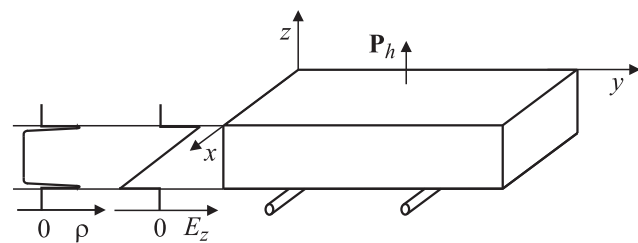


Рис. 3. Распределение пьезоэлектрических зарядов ρ и напряженности электрического поля E_z в объеме образца монокристалла GaAs с ориентацией {100}, $\langle 110 \rangle$ при изгибной деформации.

кристалла в точках, между которыми определяется фотоэдс, T — температура, k — постоянная Больцмана. Направление поля Дембера совпадает с направлением градиента концентрации носителей и перпендикулярно поверхности пластины.

Подставляя в (1) значения $\mu_n = 2000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и полагая, что σ_0, σ_1 — соответственно проводимость на поверхности и на глубине, равной диффузионной длине, получим: $U_D = 21 \text{ мВ}$. Это есть значение разности потенциалов, вызванное объемным фотоэффектом на глубине L .

Примем: l — расстояние от внешней границы облучаемой поверхности в отрицательном направлении оси z (рис. 3). Так как напряженность поля Дембера пропорциональна первой производной проводимости по координате l , а σ убывает в глубь образца экспоненциально, то

$$E = E_{\max} \exp(-l/L). \quad (2)$$

Здесь E_{\max} — напряженность поля на внешней границе со стороны облучаемого слоя, L — диффузионная длина.

На глубине $l = L$ напряженность поля будет равна

$$E = E_{\max}/e. \quad (3)$$

Из полученного выше значения $U_D = 21 \text{ мВ}$ (фотоэдс в слое толщиной L) получим среднее значение напряженности поля Дембера по диффузионной длине 220 мкм:

$$E_L = U_D/L = 95 \text{ В/м}. \quad (4)$$

Зная среднюю напряженность поля по диффузионной длине, определим E_{\max} и распределение E по толщине образца на глубину L :

$$E_L = \frac{1}{L} \int_0^L E_{\max} \exp(-l/L) dl. \quad (5)$$

Интегрируя (5), получим

$$E_{\max} = eE_L/(e - 1). \quad (6)$$

При вычислении окончательно получим

$$E = E_L \exp[-(l/L - 1)]/(e - 1). \quad (7)$$

На рис. 4 показана полученная зависимость, экстраполированная в область от $l = L = 220 \text{ мкм}$ до $l = 400 \text{ мкм}$. Из рисунка видно, что напряженность электрического поля в приповерхностной области пластины составляет $\sim 140 \text{ В/м}$ и экспоненциально убывает в глубь образца. С учетом (4) и (5) расчетное значение фотоэдс по толщине пластины будет равно $\sim 28 \text{ мВ}$, что согласуется с экспериментально полученным значением стационарной объемной фотоэдс на обкладках исследуемой пластины GaAs $\sim 25 \text{ мВ}$.

Обращает на себя внимание сходство характеров распределения по глубине пластины напряженности поля

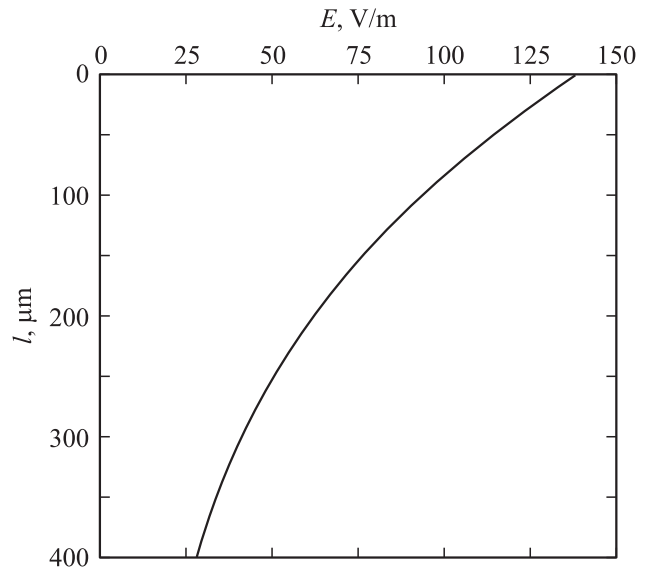


Рис. 4. Распределение поля Дембера по толщине пластины GaAs.

Дембера E (рис. 4) и напряженности пьезоэлектрического поля, вызванного деформацией изгиба, E_z (рис. 3). Из этого следует, что демберовское поле, пронизывающее большую часть объема пластины, способно привести к деформации изгиба пластины за счет обратного пьезоэлектрического эффекта.

Под влиянием одиночного импульса света возникающее демберовское поле, направление которого в заданной ориентации пластины совпадает с пьезоактивным направлением кристалла (электрической осью), вызывает деформацию пластины за счет обратного пьезоэффекта:

$$\varepsilon_{ij} = d_{ijk} E_k, \quad (8)$$

где ε_{ij} — деформация в направлении осей x и y , d_{ijk} — пьезоэлектрический модуль, E_k — поле Дембера.

В используемой геометрии образца при условии электрической однородности полупроводника существует единственная отличная от нуля компонента вектора \mathbf{E} , направленная вдоль оси z . Из соображений симметрии следует, что возникающая в кристалле деформация может иметь составляющие: ε_{zz} — сжатие–растяжение вдоль оси z , т.е. по толщине образца; ε_{yy} — сжатие–растяжение вдоль оси y , или вдоль длинной оси; ε_{xx} — сжатие–растяжение вдоль оси x , т.е. в направлении ширины. Деформация вдоль оси z существенных последствий для возбуждения колебаний изгиба не имеет. Эта компонента деформации может лишь возбуждать колебания сжатия–растяжения вдоль оси z , частота которых ввиду малой толщины образца гораздо выше наблюдаемых в экспериментах.

Компоненты ε_{xx} и ε_{yy} неоднородны по глубине образца ввиду неоднородности порождающего их демберовского поля. Поэтому обе эти компоненты должны приводить к изгибу образца. Однако, поскольку вдоль

оси y образец в несколько раз больше, чем вдоль оси x , при одинаковых значениях ε_{xx} и ε_{yy} образец будет сильнее изгибаться вдоль плоскости zy , чем вдоль плоскости zx . Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только компоненту ε_{yy} , которая связана с единственной существенной компонентой электрического поля E_z соотношением пропорциональности

$$\varepsilon_{yy} = dE_z. \quad (9)$$

В наиболее благоприятной ориентации с точки зрения пьезоэффекта (ось z вдоль $\langle 100 \rangle$, ось y вдоль $\langle 110 \rangle$) коэффициент пропорциональности d в (9) по порядку величины равен пьезомодулю материала d_{14} , который для арсенида галлия составляет значение $2.7 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н [11]. Подставляя в выражение (9) значение напряженности поля Дембера в приповерхностной области пластины, получаем величину относительной деформации ε_{yy} , возникающей вдоль направления длинной оси образца и приводящей к его изгибу:

$$\varepsilon_{yy} = 3.8 \cdot 10^{-10}. \quad (10)$$

Полученное значение является величиной статической деформации, возникающей при стационарном оптическом облучении пластины пьезоактивного среза. В реальных экспериментах образец возбуждался импульсным светом на частоте механического резонанса. В этом случае амплитуда деформации при колебаниях будет в Q раз больше, чем статическая, где Q — величина механической добротности колеблющейся пластины, которая составляла в экспериментах значение $\sim 10^4$ (величина внутреннего трения 10^{-4}). С учетом этого амплитуда относительной деформации образца на резонансной частоте будет иметь значение $3.8 \cdot 10^{-6}$. Это значение по порядку величины совпадает с определенным экспериментально значением амплитуды относительной деформации исследованных пластин $\sim 10^{-6}$ (по значению девиации частоты в схеме измерений).

Процесс импульсного оптического возбуждения изгибных колебаний пластины качественно можно представить следующим образом. Световой импульс вызывает изгиб пластины в результате обратного пьезоэффекта. После прекращения действия импульса за счет рекомбинации неравновесных носителей заряда экспоненциально во времени уменьшается напряженность демберовского поля и сила упругости возвращает образец в исходное состояние. Ввиду инерционности процесса образец „проскакивает“ положение равновесия и возникают обычные упругие резонансные колебания. Следующий импульс вызывает аналогичный эффект, и, если частота следования световых импульсов совпадает с частотой изгибных колебаний, создаваемая ими вынуждающая сила оказывается синфазной с колебаниями образца, что вызывает резонанс и увеличение амплитуды деформации в Q раз.

4. Заключение

Колеблющуюся под действием оптических импульсов полупроводниковую пластину пьезоэлектрического среза можно рассматривать как пьезоэлектрический резонатор с оптической накачкой. Если в случае обычного диэлектрического пьезоэлектрического резонатора электрическая энергия для поддержания резонансных колебаний кристалла передается через электроды на его поверхности, то в нашем случае источником внешней энергии является оптический сигнал, преобразуемый в полупроводниковой пластине в импульсы объемной или барьерной фотоэдс. Так как механическая добротность современных полупроводниковых кристаллов составляет величину порядка 10^5 – 10^6 , для поддержания резонансных колебаний пластины требуется очень малая энергия. Следовательно, на базе описываемого эффекта можно создавать полупроводниковые фотоприемные устройства с высокой спектральной чувствительностью и высокой избирательностью по частоте оптической модуляции. Для охвата широкого диапазона частот оптических сигналов можно использовать изгибные [6], продольные [12] или поверхностные акустические волны [13].

Список литературы

- [1] В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. *Лазерная оптоакустика* (М., Наука, 1991).
- [2] T. Ikari, K. Miyazaki, A. Fukuyama, H. Yokoyama, K. Maeda, K. Futagami. *J. Appl. Phys.*, **71** (5), 2408 (1992).
- [3] A. Fukuyama, A. Memon, K. Sakai, Y. Akashi, T. Ikari. *J. Appl. Phys.*, **85** (3), 1751 (2001).
- [4] К.Л. Муратиков, Ф.Л. Глазков. *ЖТФ*, **70** (8), 69 (2000).
- [5] С.А. Ахманов, В.Э. Гусев. *Успехи физ. наук*, **162** (3), 23 (1992).
- [6] В.И. Митрохин, С.И. Рембеза, А.А. Руденко. *Письма ЖТФ*, **32** (11), 32 (2006).
- [7] В.И. Фистуль. *Атомы легирующих примесей в полупроводниках* (М., Физматлит, 2004).
- [8] V.I. Mitrokhin, S.I. Rembeza, V.V. Sviridov, N.P. Yaroslavl'tsev. *Phys. Status Solidi*, **119**, (2), 535 (1990).
- [9] В.И. Митрохин, С.И. Рембеза, А.А. Руденко. *Перспективные материалы*, **12** (6), 23 (2006).
- [10] Я. Тауц. *Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Изд-во иностранной литературы, 1962).
- [11] М.П. Шаскольская. *Акустические кристаллы. Справочник* (М., Наука, 1982).
- [12] В.И. Митрохин, С.И. Рембеза, И.С. Карманов. *Тр. Междунар. науч. конф. „ФТТ-2009“* (Минск, 2009) т. 2, с. 41.
- [13] В.И. Митрохин, О.В. Николаев, С.И. Рембеза, Л.Н. Кузеванов. Патент на полезную модель № 77735. Российская Федерация, МПК H03H 7/00. Приоритет 03.06.2008.

Редактор Л.В. Шаронова

Photopiezoelectric inducing of resonance acoustic waves in single crystals of semiinsulating gallium arsenide

V.I. Mitrokhin, S.I. Rembeza, R.N. Antonov

Voronezh State Technical University,
394026 Voronezh, Russia

Abstract The effect of excitation of resonance acoustic waves in semiinsulating GaAs single crystals by means of light pulses is investigated. The maximum of amplitude of excited elastic fluctuations was observed in the temperature interval where small values of internal friction and electroconductivity of the semiconductor take place simultaneously. The effect is connected with reverse piezoelectric transformation of bulk photo-emf energy into mechanical deformation of the semiconductor crystal. Results of researches can be used for design of semiconductor photodetectors with high selectivity on modulation frequency.