

исследования может оказаться полезной при исследовании и других сценариев возникновения стохастической синхронизации.

В заключение авторы выражают благодарность И.С. Арансону, А.Г. Максимову, М.И. Рабиновичу за полезные обсуждения и замечания.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А ф р а й м о в и ч В.С., В е р и ч е в Н.Н., Р а б и н о в и ч М.И. // Изв. вузов, Радиофизика. 1986. Т. 29. № 9. С. 1050-1060.
- [2] К у з н е ц о в С.П., П и к о в с к и й А.С. Взаимодействие систем со стохастическим поведением. Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987. 400 с.
- [3] А с т а х о в В.В., Б е з р у ч к о Б.П., П о н о м а р е н к о В.И., С е л е з н е в Е.П. // Изв. вузов, Радиофизика. 1988. Т. 31. № 5. С. 627-630.
- [4] А н и щ е н к о В.С., П о с т н о в Д.Э. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 6. С. 569-573.
- [5] Д м и т р и е в А.С., К и с л о в В.Я., С т а р к о в С.О. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 12. С. 2417-2419.
- [6] В о л к о в с к и й А.Р., Р у л ь к о в Н.Ф. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 16. С. 1508-1513.
- [7] В е р и ч е в Н.Н. Методы качественной теории дифференциальных уравнений. Горький, 1986. С. 47-57.
- [8] А ф р а й м о в и ч В.С. Внутренние бифуркации и кризисы аттракторов. Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987. 400 с.

Горьковский государственный
университет
им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию
22 декабря 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 7
05.3; 08

12 апреля 1989 г.

РАДИАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕТАЛЛОВ В ОБЛАСТИ
СТРУКТУРНОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

А.И. К а л и н и ч е н к о, Г.Ф. П о п о в

1. Повсеместный интерес к исследованиям структурных фазовых переходов и метастабильных состояний в твердых телах, обусловленный возможностями создания на их основе новых материалов и устройств, делает актуальной разработку методов определения механических и теплофизических характеристик вещества, обладающих высоким временным разрешением, быстрым действием и универсальностью. Для этих целей перспективным представляется использование

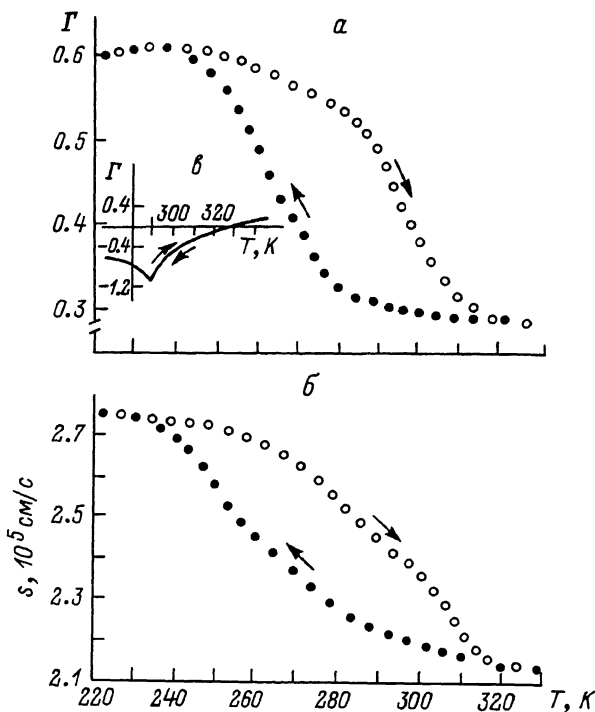


Рис. 1. Температурные зависимости термоупругих величин исследуемых образцов вблизи структурных фазовых переходов: а) параметра Грюнайзена $\Gamma(T)$ сплава $\text{Cu} - \text{Al} - \text{Ni}$; б) скорости звука $s(T)$ сплава $\text{Cu} - \text{Al} - \text{Ni}$; в) параметра Грюнайзена $\Gamma(T)$ гадолиния.

эффекта возбуждения термоупругих волн при импульсном облучении вещества [1, 2]. В приближении мгновенного ввода энергии и при условии, что радиационный перегрев ΔT не приводит к существенному изменению термоупругих характеристик вещества, выражение для амплитуды термоупругой волны $\sigma(x, t)$ имеет вид [3]:

$$\sigma(x, t) = \frac{\Gamma}{2} \mathcal{E}(x - st). \quad (1)$$

Соотношение (1) позволяет при контролируемой плотности поглощенной энергии $\mathcal{E}(x)$ проводить в радиационно-акустических экспериментах прямые измерения параметра Грюнайзена Γ и продольной скорости звука s в широком диапазоне изменения внешних условий.

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований температурных зависимостей $\Gamma(T)$ и $s(T)$ для сплавов с эффектом памяти формы ($\text{Cu} - \text{Al} - \text{Ni}$ и $\text{Ni} - \text{Ti}$) и гадолиния вблизи их структурных фазовых переходов. Обсуждается

влияние тепловой и пространственной нелинейности параметра Грюнрайзена на вид возбуждаемой акустической волны, а также возможность определения функции $\Gamma(T)$ по нелинейному термоакустическому отклику облученного вещества.

2. Измерения проводились на пучке электронов с энергией $E_e = 5 \text{ МэВ}$, числом частиц в импульсе $10^9 - 10^{10}$, длительностью импульса $t_e = 10^{-6} \text{ с}$, диаметром пучка $D = 1-4 \text{ см}$. Исследуемые образцы представляли собой круглые стержни диаметром $d = 0.25 \text{ см}$ и длиной $l \gg D$. Выполнение условий $fd \ll E_e$, $d + st_e \ll D$, а также малость радиационного перегрева вещества $\Delta T = (10^{-3} - 10^{-2}) \text{ К}$ за один пуск ускорителя обосновывали применимость выражения (1) при анализе термоакустического отклика (χ - удельные потери энергии электрона).

На рис. 1, а, б представлены зависимости $\Gamma(T)$ и $S(T)$ для сплава $\text{Cu} - \text{Al} - \text{Ni}$. Гистерезисный характер зависимостей (направления изменения температуры обозначены стрелками) указывает на двухфазность материала в области фазового перехода. Установлено, что форма петли гистерезиса чувствительна к изменениям состава исследованных образцов, а положение петли на температурной оси систематически изменяется от цикла к циклу. Аналогичный характер имеет зависимость $\Gamma(T)$ для нитинола $\text{Ni} - \text{Ti}$. Напротив, измерения параметра Грюнрайзена гадолиниевого образца в области фазового перехода „ферро-парамагнетик“ ($T = 290 \text{ К}$) (рис. 1, в) показали отсутствие гистерезиса, что характерно для фазовых переходов 2-го рода.

Представления о структуре вещества вблизи фазового перехода как квазиоднородной двухфазной системе [3] с зависящей от температуры концентрацией фаз позволили получить соотношение между величинами $\Gamma(T)$ и $S(T)$, согласующееся с приведенными экспериментальными данными.

3. При сильном радиационном перегреве, либо когда начальная температура вещества T близка к нулю или точке разрыва функции $\Gamma(T)$, параметр Грюнрайзена уже нельзя считать постоянной величиной в процессе генерации акустической волны. Поэтому связь между амплитудой волны $\epsilon(x, t)$ и плотностью поглощенной энергии $\mathcal{E}(x, t)$ становится нелинейной:

$$\epsilon(\tau) = \frac{1}{2s} \int_{-s\tau}^{\infty} \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \int_0^{\mathcal{E}(\xi, \tau + \frac{\xi}{s})} \Gamma(\mathcal{E}') d\mathcal{E}' \right\} d\xi. \quad (2)$$

Здесь введены обозначения $\tau = t - \frac{x}{s}$, $\Gamma(\mathcal{E}) = \Gamma(T + \frac{\mathcal{E}}{\rho C})$, ρ - плотность, C - удельная теплоемкость вещества. Скорость звука s считается постоянной.

На рис. 2 показана трансформация упругой волны $\epsilon(t)$, возбуждаемой в гадолинии, при изменении температуры. Расчет проводился с использованием экспериментально определенной зависимости

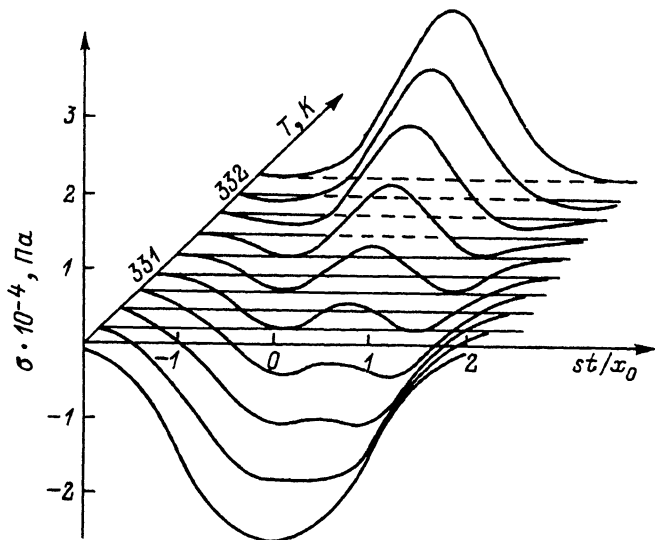


Рис. 2. Трансформация упругой волны $\sigma(t)$, возбуждаемой в гадолиниевом образце импульсным пучком релятивистских электронов, при изменении температуры образца T (расчетная кривая).

$\Gamma(T)$ (рис. 1, в) для гауссова распределения поглощенной энергии с полушириной x_0 и при условии $t_B \ll \frac{x_0}{s}$. Из рисунка видно, что вблизи нуля параметра Грюнайзена ($T=332$ К) пропорциональность между профилем поглощенной энергии $\mathcal{E}(-st)$ и возбуждаемой упругой волной $\sigma(t)$ нарушается, упругая волна приобретает характерный „W-образный” вид и ни при какой температуре не обращается в нуль. Такое поведение акустического отклика согласуется с результатами экспериментальных исследований на гадолинии.

В приближении мгновенного ввода энергии выражение (2) приводится к виду, допускающему обращение:

$$\Gamma[x(\mathcal{E})] = 2 \frac{d\sigma(-\frac{x}{s})}{dx} \cdot \frac{dx(\mathcal{E})}{d\mathcal{E}}, \quad (3)$$

где функция $x = x(\mathcal{E})$ предполагается дифференцируемой во всем интервале изменения аргумента \mathcal{E} . Выражение (3) дает решение задачи определения неизвестной зависимости $\Gamma = \Gamma(\mathcal{E})$ по известному профилю поглощенной энергии $\mathcal{E}(x)$ и амплитуде акустического импульса $\sigma(t)$. Такой метод эффективен, если при однократном облучении образца в зоне взаимодействия реализуется достаточно широкий диапазон температур $0 \leq \Delta t(x) \leq \Delta T_m$. С этой точки зрения перспективным представляется использование

сильноточных электронных пучков ($E_e \approx 1 \text{ МэВ}$, $J = 10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $t_D \lesssim 1 \text{ мкс}$), реализующих перегревы $\Delta T_m = (1-10^3) \text{ К}$. Предельно допустимые значения переносов излучения J_m при этом ограничиваются откольной прочностью σ_c исследуемого материала [3] и (при наличии у образца свободной границы) определяются из уравнения

$$\frac{1}{2} \int_0^{J_m X} r(\epsilon) d\epsilon = \sigma_c. \quad (4)$$

Отметим, что если параметр Грюнайзена не зависит от плотности поглощенной энергии ϵ , но является функцией координаты $\Gamma = \Gamma(x)$, уравнение (1) остается справедливым, если в нем принять $\Gamma = \Gamma(x - st)$. Это позволяет определить функцию $\Gamma = \Gamma(x)$ в зоне взаимодействия излучения с веществом.

Таким образом, величина Γ , играющая важную роль при построении уравнения состояния твердого тела, определяется в радиационно-акустическом эксперименте независимо от традиционных трудоемких измерений теплоемкости, коэффициента теплового расширения и сжимаемости. Это особенно важно при исследованиях вблизи фазовых переходов, характеризующихся аномальным поведением перечисленных характеристик, а также при исследованиях гетерогенных систем, для которых связь Γ с указанными характеристиками не является однозначной [3]. Использование сильноточных электронных пучков позволит определять температурную зависимость параметра Грюнайзена в широком диапазоне температур в результате одного измерения. В этом случае, как и при оценке влияния облучения на механические свойства материалов [3-5], необходим корректный учет нелинейности термоупругого отклика вещества.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Боршковский И.А., Воловик В.Д., Гришаев И.А., Дубовик Г.П., Залюбовский И.И., Петренко В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 13. В. 10. С. 546-549.
- [2] McLean F.B., Oswald R.B., Jr., Schallhorn D.R., Buxton L.D. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 9. P. 3474-3478.
- [3] Залюбовский И.И., Калининченко А.И., Лазурик В.Т. Введение в радиационную акустику. Харьков: Вища школа, 1986. 168 с.
- [4] Ганн В.В., Жуков А.И., Блажевич С.В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1983. В. 4(27). С. 75-78.

[5] Блинов В.И., Геринг Г.И., Елисеев Н.А. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 11. С. 2228-2231.

Харьковский государственный
университет
им. А.М. Горького

Поступило в Редакцию
7 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 7
06.3; 12

12 апреля 1989 г.

СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ $p-i-n$ ФОТОДИОД
НА ОСНОВЕ $GaInAsSb$ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО
ДИАПАЗОНА 1.5-2.3 мкм

И.А. Андреев, М.А. Афраилов,
А.Н. Баранов, С.Г. Конников,
М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова,
О.В. Салата, В.Б. Уманский,
Г.М. Филаретова, Ю.П. Яковлев

В ИК-волоконно-оптических линиях связи на основе флюоридных волокон в спектральном диапазоне 2-4 мкм ожидаются потери менее 0.01 дБ/км [1], что на порядок ниже, чем в кварцевых волокнах в диапазоне 1.3-1.6 мкм. Прогресс, достигнутый в технологии создания таких волокон [2], и сообщение о первом промышленном выпуске флюоридного волокна [3] стимулируют интерес к созданию элементной базы ИК-ВОЛС III поколения (источников света и фотоприемников) для этого спектрального диапазона.

В последние годы появились сообщения о создании эффективных инжекционных лазеров на основе твердых растворов $GaInAsSb$ для диапазона 2-2.4 мкм [4-6], в том числе работающих в непрерывном режиме при комнатной температуре [7], а также некоторые работы по фотоприемникам для этого диапазона на основе многокомпонентных твердых растворов A^3B^5 [8, 9].

Ранее [9] мы сообщали о создании и исследовании первых неохлаждаемых фотодиодов с постоянной квантовой эффективностью ~ 0.6 в диапазоне 1.4-2.2 мкм и быстродействием $\tau \approx 0.5$ нс, а также лавинных фотодиодов [10] на основе твердых растворов $GaInAsSb / GaAlAsSb$.

В настоящей работе приведены результаты создания и исследования сверхбыстродействующего $p-i-n$ фотодиода на основе $GaInAsSb$.

Структуры выращивались методом ЖФЭ на подложке $GaSb$ p -типа с концентрацией носителей заряда $p = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Слой твердого раствора толщиной 2 мкм $GaInAsSb$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0.53$ эВ, специально не легированного, покрывался широкозонным слоем $N^+ - GaAlAsSb$ с концентрацией $N = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($E_g \approx 1.2$ эВ) и толщиной 3 мкм.