

05;07;12

## Кинетика субнанометровых смещений поверхностей твердых тел при локальном импульсном лазерном нагреве

© С.В. Винценц, С.Г. Дмитриев

Институт радиотехники и электроники РАН,  
141120 Фрязино, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 23 октября 1995 г.)

Предложен метод исследования кинетики смещений и деформаций поверхностей твердых тел с пространственно-временным разрешением  $\Delta r \sim \text{мкм}$ ,  $\delta t \sim 0.1 \text{ мкс}$ , индуцированных локальным импульсным лазерным облучением с амплитудой смещений ангстремного масштаба. Мгновенные профили деформаций регистрировались в наборе точек поверхности на микронных масштабах методом фототермической деформации поверхности (ФТДП) по кинетикам отклонения зондирующего лазерного луча с последующей выборкой данных, соответствующих одному и тому же моменту времени; мгновенные профили смещений получались численным интегрированием по радиусу мгновенных профилей деформаций. Представлены полученные таким образом мгновенные профили деформаций и смещений ангстремного масштаба для ряда металлических образцов. Обсуждается природа полученных кинетик смещений в центре греющего лазерного пятна с размерами  $\sim 10\text{--}100 \text{ мкм}$ .

### Введение

Интерес к исследованию деформаций и смещений поверхностей твердых тел под воздействием импульсного лазерного излучения связан с исследованием целого ряда явлений, таких как деградация зеркал [1], включая и излучение весьма сложной иерархии возникающих при этом процессов [2], кинетика быстропротекающих обратимых фазовых переходов [3,4], генерация звука [5], устойчивость полупроводниковых образцов [6], в частности проблема низкопорогового локального дефектообразования [7], а также исследование процессов ионной имплантации в приповерхностных слоях [8]. Кроме этого, измерения кинетики деформаций позволяют определять некоторые тепловые, оптические и упругие константы твердых тел [9,10].

Традиционно такого рода измерения проводятся в областях больших размеров (порядка миллиметра или больше) интерференционными методами [2,11–13] или с помощью зондирования деформаций поверхности лазерным лучом по его отклонению [14,15]. В областях с размерами, меньшими 100 мкм, изучались либо смещения в центре луча [16], либо деформации в точках максимального наклона поверхности [17].

В то же время наиболее информативным является изучение пространственных профилей деформаций и особенно смещений поверхностей по всей зоне облучения, а также за ее пределами. При этом в ряде задач, например в проблеме локального дефектообразования при быстропротекающих процессах ( $\tau \leq 1 \text{ мкс}$ ) в областях размерами 10–100 мкм или меньше, представляет интерес получение мгновенных профилей деформаций и смещений с разрешением по времени  $\Delta t \sim 0.1 \text{ мкс}$  и по поверхности  $\Delta r \sim \text{мкм}$ . Такие данные в настоящее время в литературе отсутствуют.

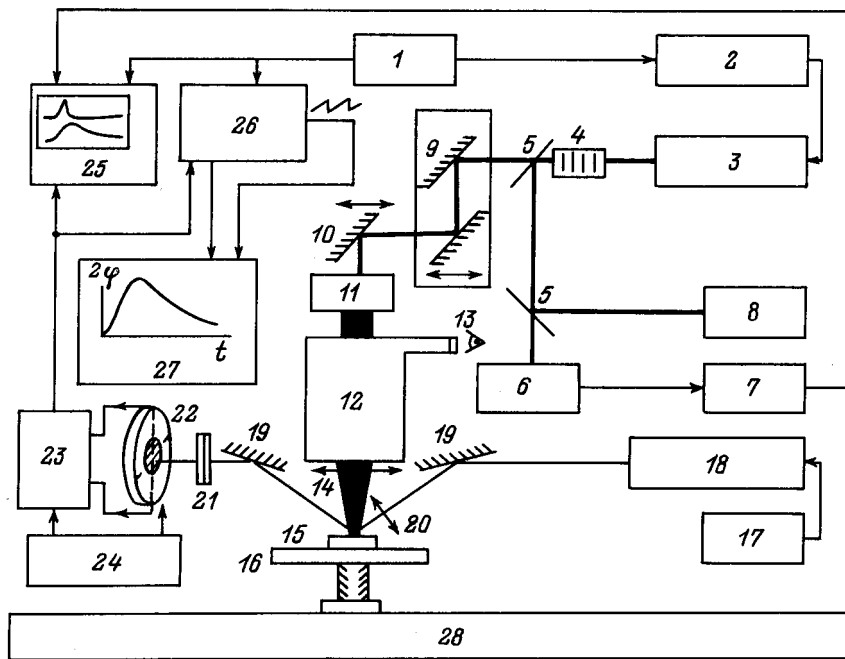
Поскольку амплитуды смещений вблизи порога дефектообразования порядка нескольких нм [7], то для изучения кинетики допороговых деформационных процессов необходимы измерения в субнанометровом диапазоне смещений.

В настоящей работе предложена методика измерений, позволяющая регистрировать мгновенные профили деформаций и смещений в указанном диапазоне параметров.

### Метод исследований

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Определенная часть поверхности образцов подвергалась повторяющемуся во времени нестационарному нагреву за счет поглощения лазерного излучения. Локальная деформация  $\varphi = du_z/dr$  ( $u_z$  — нормальное смещение поверхности,  $r$  — расстояние по поверхности от центра лазерного пятна до точки зондирования,  $\varphi$  — угол наклона деформированной поверхности) возникала вследствие разогрева и теплового расширения вещества и определялась из изменений в угле отражения  $2du_z/dr$  непрерывно зондирующего луча с помощью позиционно-чувствительного датчика [3,4,7–10]. Быстродействие системы зависело от параметров фотоприемника, широкополосности дифференциального усилителя и составляло  $\sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ .

Для нагрева использовалось одномодовое излучение лазера Г-Ои-8-1 (ЛТИ-501) на алюмоиттриевом гранате с длиной волны  $\lambda_r = 1.06 \text{ мкм}$ , временем нарастания фронта импульсов  $\tau \simeq 350 \text{ нс}$  и более длительным [18,19] спадом  $\sim 1 \text{ мкс}$ . Частота повторения импульсов составляла 4 кГц, а энергия могла регулироваться (светофильтрами) в пределах



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки. 1 — генератор опорных импульсов Г5-56; 2 — блок питания лазера Г-Ои-8-1; 3 — излучатель Г-Ои-8-1 (излучатель ЛТИ-701 с  $\lambda_r = 0.53 \mu\text{м}$ ); 4 — ослабитель импульсного луча; 5 — светоделительные пластины; 6 — фотодиод ФД-271 для контроля длительности и формы лазерных импульсов; 7 — широкополосный усилитель УЗ-33; 8 — измеритель средней мощности ИМО-2Н; 9 — устройство для перемещения греющего луча относительно точки зондирования; 10 — перемещаемое зеркало; 11 — расширитель луча; 12 — микроскопическая приставка СОК-1 (СОК1-01 для  $\lambda_r = 0.53 \mu\text{м}$ ); 13 — канал визуального контроля (окуляр микроскопа); 14 — объектив; 15 — образец; 16 — оптический стол изменяющейся высоты, контролируемой микрометром; 17 — блок питания зондирующего лазера; 18 — излучатель He-Ne лазера ЛГ-79-1; 19 — зеркала; 20 — короткофокусная фокусирующая линза; 21 — светофильтры, блокирующие рассеянное импульсное излучение; 22 — координатно-чувствительный фотодиод ФД-141К; 23 — широкополосный дифференциальный предусилитель; 24 — блоки питания Б5-49; 25 — осциллограф С1-74; 26 — усреднитель серии импульсных сигналов PAR-162 (стробоскопический осциллограф С1-91/3); 27 — двухкоординатный самописец Endim 622-01; 28 — массивная оптическая плита, на которой смонтированы элементы оптической схемы.

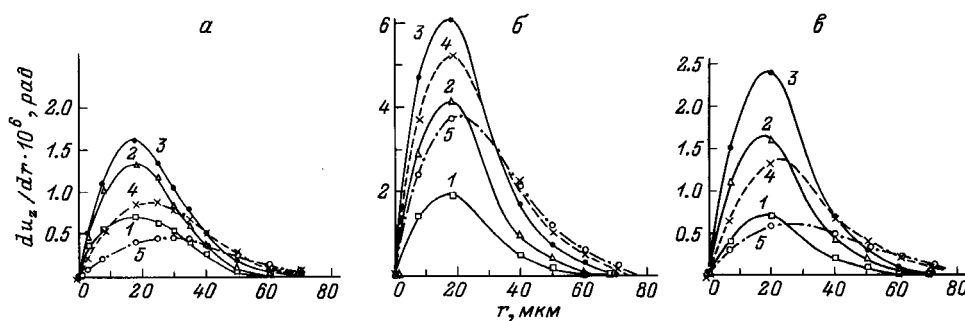
$10^{-8}$ – $10^{-4}$  Дж и была  $E \sim 1\text{--}1.5 \cdot 10^{-7}$  Дж. Размер греющего лазерного пятна  $2\omega \simeq 50 \mu\text{м}$  оценивался по распределению интенсивности света при частичном перекрытии луча, дополнительно определялся с помощью теории [20], а также контролировался во время облучения микроскопической приставкой СОК-1. С помощью расширителя луча можно было изменять размер пятна на образце в пределах 30–150 мкм.

Характеристики зондирующего излучения:  $\lambda_3 = 0.63 \mu\text{м}$ , мощность  $\sim 1 \text{ мВт}$ , размер зонда  $\sim 10 \mu\text{м}$ . Радиальное распределение деформаций исследовалось изменением расстояния от точки зондирования до центра греющего пятна в интервале 0–200 мкм с точностью  $\sim 1 \mu\text{м}$  с помощью перемещения зеркал в канале греющего луча. Применялись также дополнительные светофильтры для развязки по длине волны греющего и зондирующего света, а также низкочастотный ( $\sim 1 \text{ кГц}$ ) фильтр и массивная оптическая плита для подавления нежелательных вибраций.

Чувствительность установки определялась флуктуациями излучения зондирующего лазера и в режиме накопления сигнала на интеграторе PAR-162 с постоянной времени 1 с позволяла регистрировать уровни сигнала, соответствующие локальным наклонам поверхности  $\sim 10^{-8}$  рад при поглощенной образцом энергии в каждом импульсе  $\sim 1 \text{ нДж}$  [21].

Метод регистрации изучаемого фототермодеформационного сигнала основан на измерении напряжений на координатно-чувствительном фотоприемнике, возникающих вследствие отклонения зондирующего луча. Начальное положение фотоприемника по отношению к зондирующему лучу выбирается по максимальной компенсации сигналов от двух частей фотоприемника и минимизации шумов. При этом величина сигнала  $V_s$  определяется дисбалансом светового потока при отклонении луча, вольт-ваттной чувствительностью фотодиода и усилением дифференциальной схемы

$$V_s = K_1 I_0 R 2 du_z / dr + \delta,$$



**Рис. 2.** Мгновенные профили деформаций, полученные на массивных ( $25 \times 25 \times 5$  мм) образцах. Материал;  $E$ , Дж и  $R$  соответственно: *a* — латунь,  $1.1 \cdot 10^{-7}$ ; 0.8; *б* — сталь,  $1.5 \cdot 10^{-7}$ , 0.6; *в* — дюралюминий,  $1.2 \cdot 10^{-7}$ , 0.85; моменты времени, мкс: 1 — 0.5, 2 — 1.0, 3 — 2.0, 4 — 5.0, 5 — 8.0.

где  $K_1$  — некий калибровочный коэффициент,  $I_0$  — интенсивность падающего на образец зондирующего света,  $R$  — коэффициент отражения, малая поправка  $\delta$  связана в основном со смещением точки отражения зондирующего луча вследствие деформации поверхности [9].

Рассмотрим величину погрешности в  $V_s$ , вносимую  $\delta$ . Смещение отраженного луча на фотопозиционном диоде за счет изгиба поверхности равно  $\Delta_1 = 2\phi l$ , где  $l$  — оптическая длина пути от образца до датчика. С другой стороны, смещения поверхности на величину  $u_z(r)$  приводят в этой точке к дополнительному смещению луча параллельно самому себе на величину  $\Delta_2 \sim u_z$ . Эта поправка имеет относительный порядок малости

$$\eta = \Delta_2/\Delta_1 \sim u_z/2\phi l < \varphi_{\max}/\varphi(r)(\omega/2l).$$

Последнее неравенство следует из очевидной оценки  $u_z(r) < (du_z/dr)_{\max}\omega$ . Если  $l \sim 30$  см,  $\omega \sim 10^{-2}$  см, то  $\eta \sim 1-2 \cdot 10^{-4} \varphi_{\max}/\varphi(r)$ . Это означает, что обсуждаемый эффект при измерении углов  $\varphi \sim 10^{-2} \varphi_{\max}$  вносит погрешность не более 1%.

Коэффициент отражения в процессе измерения может изменяться ( $R = R_0 + \Delta R(t)$ ) вследствие разогрева, деформации и появления свободных носителей заряда в полупроводнике, однако изменения  $\Delta R/R_0$  в указанном диапазоне параметров (при разогревах  $\Delta T \sim 1-10$  К), как правило, пренебрежимо малы (вследствие малости соответствующих коэффициентов  $dR/dT$ ) и для металлов не превышают величины с относительным порядком малости  $10^{-4}-10^{-3}$  [22-24]. Эффекты дополнительного отклонения луча из-за разогрева воздуха вблизи поверхности также малы, поскольку даже в случае низкочастотной модуляции греющего луча, когда указанная область частично прогревается, они не превышают нескольких процентов, а в диапазоне частот 1-10 МГц поправка менее 0.5-1% [25].

Таким образом, в методе фототермической деформации поверхности (ФТДП) с хорошей

точностью сигнал пропорционален углам наклона поверхности [3,4,7-10] и описывается формулой  $V_s = KI_0R_0du_z/dr$ . Для количественного определения  $du_z/dr$  дополнительно проводились измерения калибровочных коэффициентов (различных для разных веществ) с точностью не хуже 5% путем определения интенсивности света падающего на фотоприемник луча  $I_0R$ , напряжений  $V_s$  и задания известных углов наклона исследуемой поверхности в диапазоне  $\sim 10^{-5}-5 \cdot 10^{-4}$  рад с помощью качающегося оптического стола. Линейная зависимость  $V_s$  от энергии лазерных импульсов контролировалась вплоть до  $10^{-7}$  рад [8,10,21,26], поэтому измеренные коэффициенты использовались в интересующем диапазоне параметров.

На рис. 2 представлены мгновенные профили деформаций для массивных образцов из латуни, стали и дюралюминия, полученные с помощью описанной выше методики измерения кинетик  $du_z/dr(t)$  в разных точках поверхности  $r_n$  на микронных масштабах (подробнее см., например, [10]) с последующей выборкой величин углов, соответствующих одному и тому же моменту времени.

Данные на рис. 2 приведены для одного склона "горба", поскольку переход зонда на другой скат греющего лазерного пятна приводил лишь к изменению знака сигнала, а характер кинетик  $du_z/dr(t)$  и соответственно профили  $du_z/dr(t)$  оставались с точностью не хуже  $\sim 3-4\%$  прежними. Соответственно начало координат  $r_0 = 0$  выбиралось как среднее между двумя симметричными позициями зонда (например, между положениями максимальных наклонов), что отвечало занулению сигнала  $V_s$  в центре лазерного пятна [24]. Чувствительность измерений  $\sim 10^{-8}$  рад позволяла регистрировать сигнал (по радиусу) вплоть до расстояний  $r_n \simeq 150-200$  мкм.

Отметим, что дополнительную погрешность в определении профилей деформаций может вносить конечность размера зондирующего луча и его размытие, связанное с неровностями поверхностного микрорельефа. Однако в условиях настоящих экспериментов

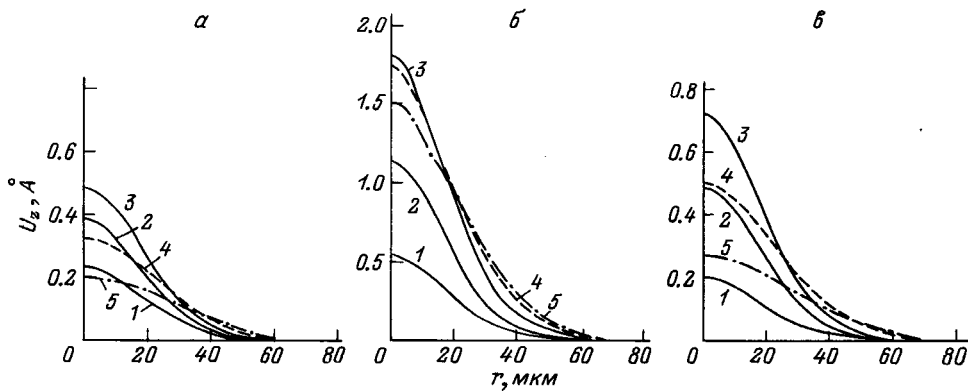


Рис. 3. Мгновенные профили смещений поверхностей образцов. Материал и моменты времени те же, что и на рис. 2.

влияние этих эффектов, по-видимому, невелико, поскольку на ранних этапах разогрева ( $\Delta t \sim 1$  мкс) регистрируемые профили (при  $r \leq \omega$ ) соответствовали гауссовой (по радиусу) форме мгновенных профилей смещений с точностью не хуже 4–5%, что соответствует теоретическим предсказаниям [27].

Таким образом, регистрация мгновенных профилей деформаций  $du_z/dr(r)$  позволяет восстанавливать мгновенные профили смещений  $u_z(r)$  путем численного интегрирования  $du_z/dr$  от "бесконечности" до  $r$ .

### Мгновенные профили и кинетика смещений

Полученные указанным образом профили смещений  $u_z(r)$  приведены на рис. 3. Заметим, что вклад в  $u_z$  от области интегрирования  $r_n \geq (2.5-3)\omega$  меньше 1–2% и пренебрежимо мало влияет на амплитуду и тем более на форму приведенных кривых в областях  $r \sim \omega$ .

Обратим внимание, что кривые  $u_z(r)$  для разных образцов имеют похожую форму, что связано с реализацией квазиодномерного характера динамики смещений в период тепловыделения, когда наблюдается рост смещений при  $r \leq \omega$ . Этот (квазиодномерный) режим связан с "накоплением" деформаций и смещений на поверхности в процессе тепловыделения и последующей диффузии тепла в глубь образцов [5,27]. При этом в отсутствие диффузии тепла вдоль поверхности смещения в центре греющего пятна должны были бы стремиться к постоянной величине, так что после окончания импульса тепловыделения  $u_z = \text{const}$ . Наиболее близко к такому насыщению приближаются смещения на поверхности стали, что определяется рядом параметров импульса облучения и образца [27], в частности меньшей (чем у других образцов) температуропроводностью.

На самом деле диффузия тепла вдоль поверхности приводит в конечном счете к уменьшению смеще-

ний, поэтому конкуренция между квазиодномерным режимом накопления смещений и запаздывающим (по отношению к импульсу тепловыделения) процессом боковой диффузии тепла приводит к появлению максимума на кривых зависимости  $u_z(r=0, t)$ , смещенного по времени относительно максимума импульса тепловыделения (рис. 4). Теоретический анализ экспериментально обнаруженного явления, а также зависимость кинетики поверхностных смещений от временной формы импульса тепловыделения проведены в работе [27].

Кинетика смещений в периферийных точках поверхности более сложна и будет рассмотрена в другой работе.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет регистрировать мгновенные профили смещений поверхностей твердых тел, индуцированные локальным импульсным лазерным облучением с пространственно-временным разрешением  $\Delta r \sim \mu\text{м}$ ,  $\Delta t \sim 0.1$  мкс при амплитудах смещений ангстремного

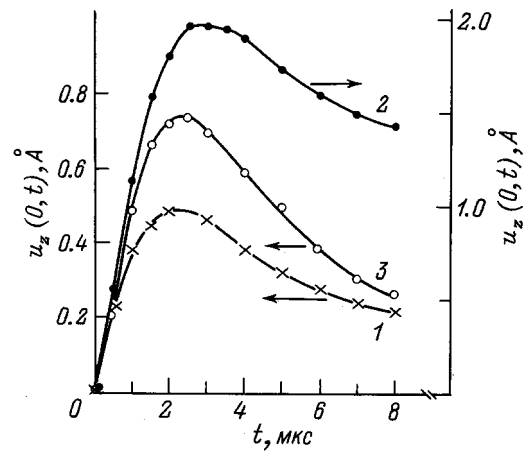


Рис. 4. Кинетика смещений поверхности в центре греющего лазерного пятна. Материал и температуропроводность, см<sup>2</sup>/с: 1 — латунь, 0.265; 2 — сталь, 0.125; 3 — дюралюминий, 0.85. Параметры импульсного облучения ( $E, \tau, 2\omega, R$ ) те же, что и на рис. 2.

масштаба. Сравнение эксперимента с теорией представляет возможность анализа природы изучаемых явлений, в частности характерных особенностей на временных зависимостях поверхностных деформаций и смещений, механизмов низкопорогового дефектообразования и других быстро протекающих процессов, например фазовых переходов первого рода.

Работа выполнена в рамках Программы исследований и при частичной поддержке Международного научного фонда и Правительства РФ (единый грант № НКО 000).

## Список литературы

- [1] *Апполонов В.В., Барчук А.И., Карлов Н.В.* и др. // Квантовая электрон. 1975. Т.2. № 2. С. 380–390.
- [2] *Луукконен Р.А., Трофименко А.М.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 10. С. 127–138.
- [3] *Vintsents S.V., Kiselev V.F., Levshin N.L.* et. al. // Surf. Sci. 1991. Vol. 241. P. 225–230.
- [4] *Vintsents S.V., Sandomirsky V.B.* // Surf. Sci. Lett. 1992. Vol. 275. P. L711–L715.
- [5] *McDonald F.A., Gutfeld R.G., Dreyfus R.W.* // Proc. of IEEE Ultrasonic Symp. 1986. Vol. 1. P. 403–406.
- [6] *Борисенко В.Е., Юдин С.Г.* // Заруб. электр. техн. 1989. Т. 1. С. 67–82.
- [7] *Винценц С.В., Дмитриев С.Г.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 19. С. 1–5.
- [8] *Винценц С.В., Миргородский В.И., Халилов Ш.С.* // Поверхность. 1990. № 9. С. 157–159.
- [9] *Olmstead M.A., Amer N.M., Kohn S.* et. al. // Appl. Phys. A. 1983. Vol. 32. P. 141–154.
- [10] *Винценц С.В.* // Поверхность. 1991. № 7. С. 155–157.
- [11] *Rousset G., Bertrand L., Cielo P.* // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. № 9. P. 4396–4405.
- [12] *Бонч-Бруевич А.М., Имас Я.А., Либенсон М.Н.* и др. // Поверхность. 1985. № 5. С. 102–105.
- [13] *Бочков Н.А., Щипалкин В.И.* // Физ. и хим. обраб. материалов. 1992. № 2. С. 59–65.
- [14] *Gutfeld R.J., McDonald F.A., Dreyfus R.W.* // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 49. N 17. P. 1059–1061.
- [15] *Dreyfus R.W., McDonald F.A., Gutfeld R.J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1987. Vol. B5. N 5. P. 1521–1527.
- [16] *Yang K.H., Zhang S.Y., Chen L.* // Proc. of 5<sup>th</sup> Intern. Top. Meet. on Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Heidelberg, 1987. P. 470–472.
- [17] *Karner C., Mandel A., Trager F.* // Appl. Phys. A. 1985. Vol. 38. P. 19–21.
- [18] *Рэди Дж.* Действие мощного лазерного излучения. М., 1974. 468 с.
- [19] *Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В.* Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
- [20] *Kogelnik H., Li T.* // Appl. Optics. 1966. Vol. 5. N 10. P. 1550–1567.
- [21] *Винценц С.В., Миргородский В.И., Носырев В.М.* и др. // Тр. IX Всесоюзного симпозиума по электронным процессам на поверхности и в тонких слоях полупроводников. Новосибирск, 1988. Т. 1. С. 89–91.
- [22] *Eesley G.L.* // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 51. P. 2140–2142.
- [23] *Eesley G.L.* // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 33. P. 2144–2147.
- [24] *Vintsents S.V., Sandomirskii V.B.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1992. Vol. 133. P. K7–K11.
- [25] *Rosencwaig A., Opsal J., Wilenborg D.L.* // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. P. 166–168.
- [26] *Барсков А.Г., Винценц С.В.* // ФТТ. 1994. Т. 36. Вып. 9. С. 2590–2598.
- [27] *Винценц С.В., Дмитриев С.Г., Шагимуратов О.Г.* // ФТТ. 1996. Т.38. Вып. 4. С. 933–1003.