

PACS: 71.10.w, 85.60.Dw, 73.40.Lq

А.И. Уколов, В.А. Надточий, Н.К. Нечволод

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИНАХ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Донбасский государственный педагогический университет
ул. Генерала Батюка, 19, г. Славянск, Донецкая обл., 84116, Украина

Статья поступила в редакцию 1 октября 2012 года

Приведены зависимости напряжений в области действия сосредоточенной силы при трехопорном изгибе тонкой полупроводниковой пластины Ge. При выбранных размерах и условиях деформирования превышение напряжений в образце вблизи концентратора существенно на глубине до 25 мкм и на расстоянии от него < 1.2 мм вдоль поверхности. Полученное методом структурного анализа распределение дефектов в приповерхностном слое качественно согласуется с результатами электрических измерений времени жизни τ неосновных носителей заряда. Использованный зондовый метод измерения τ может быть рекомендован для контроля степени дефектности на малых фрагментах интегральных схем (ИС).

Ключевые слова: напряжение, дефекты, дислокации, время жизни

Наведено залежності напружень в області зосередженої сили при триопорному згинанні тонкої напівпровідникової пластини Ge. При вибраних розмірах та умовах деформування перевищення напружень у зразку поблизу концентратора істотно на глибині до 25 мкм і на відстані від нього < 1.2 мм уздовж поверхні. Отриманий за методом структурного аналізу розподіл дефектів якісно узгоджується з результатами електричних вимірювань часу життя τ неосновних носіїв заряду. Використаний зондовий метод вимірювань τ може бути рекомендованим для контролю міри дефектності на малих фрагментах інтегральних схем (ИС).

Ключові слова: напруження, дефекти, дислокації, час життя

1. Введение

Вопросам дефектообразования в напряженных тонких пластинах Ge и Si уделяется особое внимание в связи с применением кристаллов большого размера в производстве ИС [1].

Установлено [2], что около 50% отказов в микроэлектронных приборах вызвано механическими воздействиями, возникающими в процессе производства, испытаний и эксплуатации как самого прибора, так и элементов, входящих в его состав. Распределение напряжений в полупроводниковом кристалле обусловлено совокупностью технологических операций на раз-

личных стадиях производства ИС – от выращивания до механических испытаний готовой продукции. Комплексное исследование микропластичности полупроводниковых кристаллов Ge при низких температурах ($T < 0.35T_{\text{melt}}$) показало [3], что в зависимости от уровня механических напряжений и способа деформирования вблизи поверхности образуется дефектный слой толщиной до 100 μm из вакансионно-примесных кластеров и дислокаций, а в толще кристалла сохраняется относительное совершенство [3–6]. Размеры современных полупроводниковых структур весьма ограничены как вдоль поверхности, так и по толщине и составляют десятки-сотни микрометров. Поэтому такие структуры могут находиться в пределах аномального дефектного слоя, образованного за счет действия концентраторов напряжения на краях пластины или пленочного покрытия, неровностях поверхности, включениях, скоплениях ростовых дефектов [7,8]. Уровень остаточных напряжений в ИС определяется физико-механическими характеристиками элементов конструкции, уровнями механических и термических воздействий в процессе производства и чаще всего не поддается теоретическим расчетам. В [2] отмечается отсутствие практических методов производственного контроля уровней внутренних напряжений и плотности структурных дефектов в ИС из-за сложности конструктивной иерархии активных и пассивных элементов, составляющей приборную структуру.

В данной работе показана возможность оценки распределения структурных дефектов на основе электрических измерений времени жизни τ неравновесных носителей заряда на поверхности деформированной трехопорным изгибом пластины Ge. Параметр τ претерпевает заметное уменьшение уже при малых плотностях дефектов, когда изменения концентрации и подвижности основных носителей заряда незначительны [9,10]. Зондовый метод определения τ обладает высокой степенью локальности и позволяет по распределению структурных дефектов в напряженных областях устанавливать его корреляцию с полями созданных напряжений.

2. Методика эксперимента

В эксперименте использовали монокристаллический Ge *n*- и *p*-типов проводимости в виде пластин с размерами $0.8 \times 4 \times 17 \text{ mm}$, ориентированных соответственно по направлениям [111], [112] и [110]. После резки дефекты обработки удаляли путем шлифования микропорошками АСМ-5, АСМ-1 и химико-динамического полирования. Деформирование выполняли трехопорным изгибом по схеме, приведенной на рис. 1,а. Нагружение осуществляли путем ступенчатого нарастания давления силой F . Величина одной ступени нагружения $\Delta\sigma = 10 \text{ МПа}$, время выдержки образца под нагрузкой на каждой ступени составляло 3 h, а полное время испытаний – 24 h. Для интенсификации диффузионных процессов одновременно с деформацией изгибом кристаллы Ge облучали ультразвуком (УЗ) с частотой 22.5 kHz при мощности облучения 5 W. Температура образца во время деформирования не превышала 310 K.

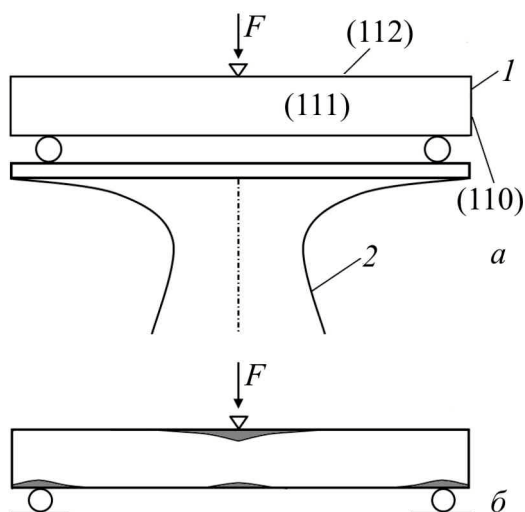


Рис. 1. Схема деформирования пластины трехопорным изгибом (а) и распределение дефектов вблизи концентраторов (б): 1 – образец Ge, 2 – акустический излучатель

Структурные исследования поверхности Ge выполняли методом оптической микроскопии. Изменение электрических свойств, обусловленных дефектами структуры, оценивали путем измерения эффективного времени жизни неосновных носителей заряда τ_{eff} импульсным методом модуляции проводимости в точечном контакте металлического зонда с поверхностью образца [11,12]. Достоинством этого метода является высокая локальность измерений: значения τ_{eff} определяются процессами рекомбинации избыточных носителей заряда на дефектах структуры в небольшой приконтактной области диаметром $\approx 10a$ (где a – радиус конца зонда), что дает возможность

оценивать уровень дефектности на очень малых фрагментах ИС. Ранее нами были определены условия [11,13], при которых данная методика определения τ_{eff} применима к структуре с дефектным поверхностным слоем. В [11] показано, что при уменьшении времени задержки t_d измерительного импульса напряжения, следующего за инжектирующим, можно оценивать степень дефектности в тонком приповерхностном слое Ge по измеренным значениям τ_{eff} .

3. Распределение напряжений вблизи концентраторов

Элементарная формула для напряжений при изгибе [14] в призматических стержнях дает удовлетворительные результаты только на некотором расстоянии от точки приложения силы. Вблизи этой точки будут значительные отклонения в распределении напряжений. Для случая тонкой пластины с прямоугольным сечением можно получить строгое решение для распределения напряжений, рассматривая действие на нее силы F при нагружении клином определенной ширины (рис. 2 [15]). Указанная на рисунке модель позволяет рассчитать концентрацию напряжений, а затем полученные результаты учесть в схеме трехопорного изгиба (см. рис. 1,а). Распределение напряжений имеет цилиндрическую симметрию радиуса r . Выделенный элемент поверхности A подвергается простому сжатию в радиальном направлении, а напряжение

$$\sigma_r = -k \frac{F \cos \theta}{br}, \quad (1)$$

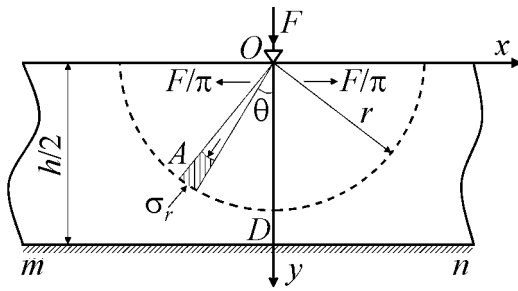


Рис. 2. Распределение напряжений в пластине под действием сосредоточенной силы F

где r – радиальное расстояние от точки приложения груза, b – ширина пластины. Коэффициент $k = \pi/2$ определяется из того обстоятельства, что напряжения σ_r , распределенные вдоль полуокружности (показанной на рис. 2 штриховой линией), находятся в равновесии с силой F . Если рассмотреть горизонтальную плоскость mn , то нормальное напряжение σ_y , действующее по этой плоскости, будет равно

$$\sigma_y = \sigma_r \cos^2 \theta = -\frac{2F \cos^3 \theta}{\pi br} = -\frac{2F \cos^4 \theta}{\pi by}. \quad (2)$$

При определении равнодействующих горизонтальных составляющих радиальных давлений в [15] показано, что сосредоточенная сила F вызывает расклинивающее действие двумя противоположными силами величиной F/π (рис. 2). В случае пластины толщиной h и шириной b эти силы, действующие на расстоянии $h/2$ от поверхности, вызывают в срединном поперечном сечении не только растягивающие напряжения, определяемые формулой

$$\sigma'_x = \frac{F}{\pi hb}, \quad (3)$$

но также и напряжения изгиба, описываемые выражением

$$\sigma''_x = -\frac{Fh}{2\pi I_z} y, \quad (4)$$

в котором $Fh/2\pi$ – изгибающий момент, вызываемый горизонтальными силами F/π ; y – расстояние от верхней плоскости пластины; $I_z = bh^3/12$ – момент инерции поперечного сечения. Накладывая напряжения из уравнений (3) и (4) на напряжение при трехопорном изгибе, определяемое по элементарной формуле для призматических стержней, находим, что нормальные напряжения в срединном поперечном сечении имеют вид

$$\sigma_x = \frac{1.5Fl}{bh^2} + \frac{F}{\pi bh} - \frac{6Fy}{\pi bh^2}. \quad (5)$$

Здесь первое слагаемое принято равным σ_{\max} , как для поверхностного слоя в обычной формуле при изгибе стержней [14]. Такое допущение правомерно для данной задачи при рассмотрении концентрации напряжений в тонком приповерхностном слое в области действия силы F .

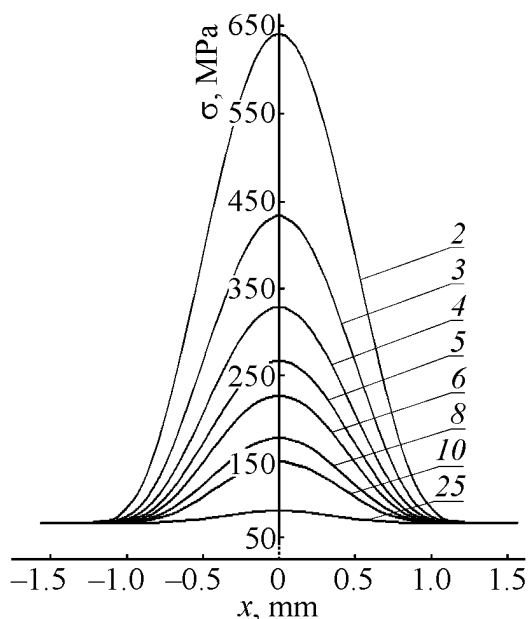


Рис. 3. Зависимость полных напряжений в области приложения силы F от расстояния x вдоль поверхности и y – в глубину пластины (на кривых указаны расстояния y , μm)

Распределение полных напряжений в области действия деформирующей силы F (см. рис. 1,а) было найдено с учетом составляющих σ_y (2) и σ_x (5), размеров пластины германия ($l = 17 \text{ mm}$, $b = 4 \text{ mm}$, $h = 0.8 \text{ mm}$), а также величины силы $F = 8 \text{ N}$. Результаты расчетов приведены графически на рис. 3, где точка приложения силы соответствует началу координат. При $x = 0$ на расстоянии от поверхности $y = 2 \mu\text{m}$ полное напряжение $\sigma \approx 650 \text{ MPa}$, но резко снижается по мере роста y (рис. 2) до значения $\sigma \approx 80 \text{ MPa}$, определяемого первым слагаемым в формуле (5), т.е. концентрация напряжений существенна лишь в слое толщиной $\sim 25 \mu\text{m}$. На расстояниях $y > 25 \mu\text{m}$ и $x > 1.2 \text{ mm}$ полное напряжение можно определить по элементарной формуле для балки при трехопорном изгибе.

Распределение напряжений в образце над нижними опорами можно найти подобным способом с учетом деформирования силой величиной $F/2$.

4. Распределение дефектов в деформированном образце по результатам электрических измерений

Учет распределения статических и знакопеременных напряжений при УЗ-воздействии, длительности испытаний при выбранной температуре ($T \sim 310 \text{ K}$), типа источников дислокаций в выращенном кристалле Ge и физических свойств приповерхностного слоя, а также выполненные структурные исследования в данной работе и в [3–8] с помощью оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии позволили установить следующее:

1. В приповерхностном слое толщиной в несколько десятков нанометров возникает массоперенос вещества вдоль поверхности, а глубже (до $5 \mu\text{m}$) – генерируются вакансионно-приместные кластеры и дислокационные петли, большей частью выходящие на поверхность. При наличии градиента напряжений диффузия атомов вдоль поверхности и вдоль дислокаций на поверхность порождает образование островков или гребней нанометровой высоты из совокупности островков [7,8]. Этот эффект наиболее выражен около концентраторов напряжений вблизи точки приложения силы F и опор.

2. В более глубоких слоях под опорами на расстоянии от поверхности до $100 \mu\text{m}$ и в тонком (до нескольких микрометров) слое, где не проявляется

концентрация напряжений от опор, образуются вакансионно-примесные кластеры сферической формы или вакансионные диски вокруг ростовых включений. Их размеры, плотность и глубина залегания зависят от уровня напряжений и пересыщения вакансиями [3,6,16], которыми интенсивно насыщается приповерхностный слой под действием статической загрузки и УЗ-облучения.

Известно, что дефекты типа дислокаций и кластеров как эффективные центры рекомбинации [17–21] уменьшают время жизни τ неосновных носителей заряда (в данном случае дырок) в соответствии с зависимостью $\tau = A/N$ (где A – константа, N – плотность дефектов).

На процессы рекомбинации неравновесных носителей электрических зарядов, инжектируемых с металлического зонда в кристалл, влияет сама поверхность, введенные деформированием дефекты приповерхностного слоя, а также ростовые дефекты в объеме кристалла. Поэтому при наличии нескольких видов рекомбинации математическую связь эффективного (изменяемого) времени жизни неосновных носителей заряда τ_{eff} с временем жизни неосновных носителей заряда на поверхности τ_s , в дефектном слое τ_l и объеме кристалла τ_V можно выразить формулой [11,17]:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_l} + \frac{1}{\tau_V}. \quad (6)$$

Величина слагаемого $\frac{1}{\tau_s} = \frac{2s}{h}$ определяется толщиной пластины h и скоростью поверхностной рекомбинации зарядов s . Значение параметра s в сильной степени зависит от состояния поверхности и может изменяться в интервале $2\text{--}10^6$ см/с. В данном эксперименте для уменьшения параметра s пластины Ge перед измерениями подвергали травлению в перекиси водорода. После такой обработки $s = 50$ см/с [22]. Время жизни τ_l в дефектном слое изменялось от 80 до 250 мкс. Величины рассчитанного времени $\tau_s = 800$ мкс и объемного времени жизни (по сертификату $\tau_V = 250$ мкс) для данного образца учитывались как постоянные. Поэтому для тонкой пластины Ge с учетом введенных дефектов структуры время жизни в слое τ_l определяли как

$$\frac{1}{\tau_l} = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} - \text{const}. \quad (7)$$

Значения τ_{eff} измеряли в разных точках вдоль образца с шагом 1 мм по прямой, проходящей посередине плоскости сжатия и растяжения. Результаты расчетов τ_l приведены на рис. 4. Концентрация дефектов и толщина дефектного слоя на плоскости растяжения максимальна в местах, где τ_l достигает своего минимума (точки a , c , e) и принимает значения, близкие к $\tau_V = 250$ мкс в областях с незначительными структурными нарушениями. Для верхней плоскости наблюдается только один провал вблизи точки f на кривой τ_l ,

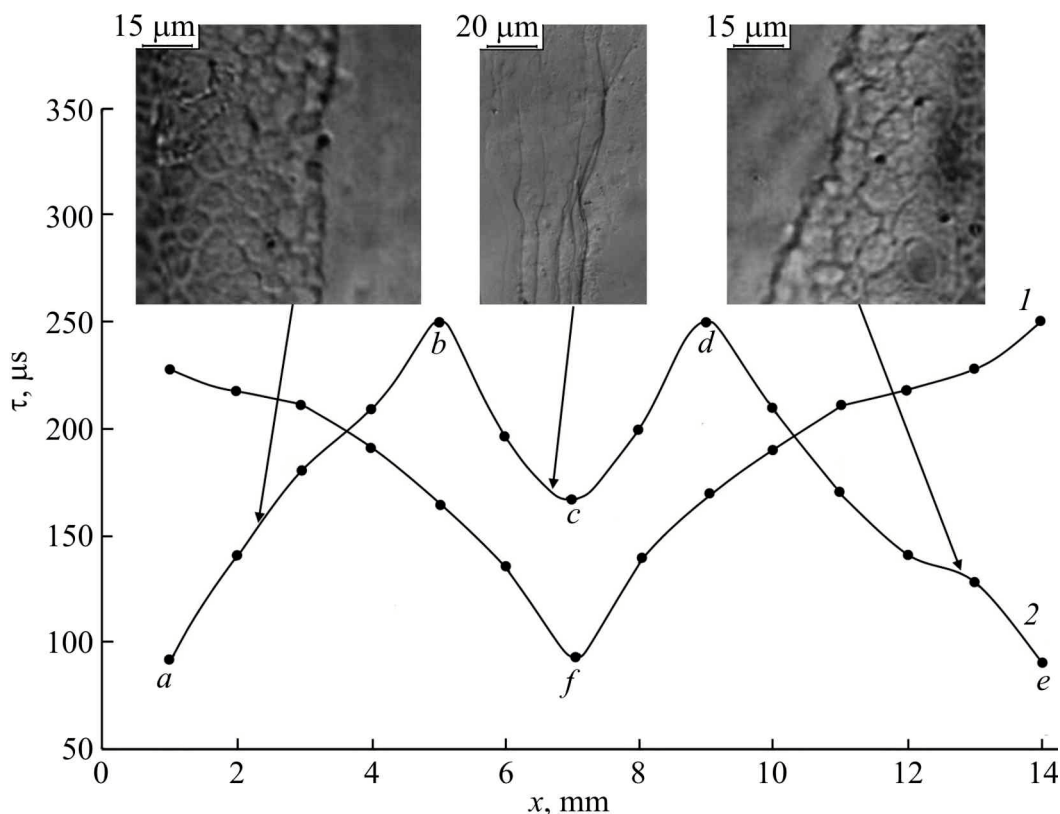


Рис. 4. Зависимость времени жизни τ_l неравновесных носителей заряда в дефектном слое от расстояния x вдоль верхней (1) и нижней (2) поверхностей пластины Ge: точки a, c, e, f – максимальная концентрация дефектов в приповерхностном слое, точки b, d – незначительные структурные нарушения. На вставках приведены оптические снимки деформационных дефектов

соответствующий области максимальной концентрации напряжений (см. рис. 1,б и рис. 3). На рис. 4 представлены оптические снимки структурных нарушений в разных областях на плоскости растяжения, выявленные химическим травлением. Подбором состава травителя и режима обработки можно зафиксировать мелкие детали структуры типа кластеров и выходов дислокаций [4–7].

5. Выводы

1. Выполнены теоретические расчеты и получена конечная формула для оценки распределения напряжений вблизи концентраторов в полупроводниковой пластине, подвергаемой трехпорному изгибу.

2. Предложен новый метод электрических измерений времени жизни неравновесных носителей заряда τ в приповерхностных слоях полупроводников, обладающий высокой степенью локальности измерений и чувствительностью к структурным нарушениям. Измерения τ на деформированных образцах Ge показали хорошее соответствие с распределением введенных структурных дефектов и механических напряжений.

1. В.А. Перевоицков, В.Д. Скупов, Вестник Нижегородского государственного университета, серия: Физика твердого тела № 2, 103 (2001).
2. В.С. Сергеев, О.А. Кузнецов, Н.П. Захаров, В.А. Лелягин, Напряжения и деформации в элементах микросхем, Радио и связь, Москва (1987).
3. В.О. Надточій, Дис. ... д-ра фіз.-мат. наук, ХНУ, Харків (2006).
4. В.А. Надточій, Н.К. Нечволод, Д.Г. Сущенко, ФТВД **11**, № 1, 104 (2001).
5. В.А. Надточій, Н.К. Нечволод, Н.Н. Голоденко, ФТВД **14**, № 3, 42 (2004).
6. V. Nadtochiy, I. Zhikharev, M. Golodenko, M. Nechvolod, Solid State Phenomena **94**, 253 (2003).
7. В.А. Надточій, А.И. Уколов, В.П. Алехин, Деформация и разрушение материалов № 4, 26 (2012).
8. В.А. Надточій, А.И. Уколов, Н.К. Нечволод, ФТВД **22**, № 3, 7 (2012).
9. Ю.А. Тхорик, Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборных структурах, Феникс, Киев (1994).
10. В.С. Вавилов, Б.М. Горин, Н.С. Данилин и др, Радиационные методы в твердотельной электронике, Радио и связь, Москва (1990).
11. А.И. Уколов, В.А. Надточій, Н.Н. Голоденко, Вісник ХНУ, серія «Фізика» **915**, № 1, 65 (2011).
12. Л.П. Павлов, Методы измерения параметров полупроводниковых материалов, Высшая школа, Москва (1987).
13. Патент на винахід 97999 МПК G01N 27/87, Спосіб визначення міри дефектності приповерхневих шарів монокристалів германію або кремнію, В.О. Надточій, О.І. Уколов, Опуб. 10.04.12.
14. Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А. Фаттахов, Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур, Радио и связь, Москва (1982).
15. С.П. Тимошенко, Соппротивление материалов. Более сложные вопросы теории и задачи, Наука, Москва (1965).
16. V. Nadtochiy, N. Golodenko, N. Nechvolod, Functional Materials **10**, 702 (2003).
17. Р. Смит, Полупроводники, Мир, Москва (1982).
18. Г. Матаре, Электроника дефектов в полупроводниках, Мир, Москва (1974).
19. М.Г. Мильвидский, В.В. Чалдышев, ФТП **32**, 513 (1998).
20. Ю.А. Концевой, ФТП **4**, 1184 (1970).
21. Л.А. Казакевич, П.Ф. Лугаков, ФТП **32**, 129 (1998).
22. L.I. Berezhinsky, E.F. Venger, I.E. Matyash, B.K. Serdega, Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics **7**, 441 (2004).

A.I. Ukolov, V.A. Nadtochy, N.K. Nechvolod

DISTRIBUTION OF THE DEFECTS IN THIN SEMICONDUCTOR PLATES AT LOW-TEMPERATURE DEFORMATION

This paper shows the possibility of evaluation of the degree of imperfection of the Ge plate in a complex stress-strain state by measuring the lifetime of minority carriers τ . The plates of monocrystalline Ge of *n*- and *p*-type in the form of $0.8 \times 4 \times 17$ mm in size oriented along the [111], [112] and [110] directions were tested. Deformation was performed by three-point bend at $\sigma_m = 80$ MPa for 24 h. The temperature of the sample during experiment did not exceed 310 K.

The focus was on evaluation of the degree of imperfection near the supports (stress concentrators) of the deformed plate. The distribution of the total stress σ near the point of force application was found with account of the effect of normal σ_x and horizontal σ_y components of the radial pressure. It is noted that at the chosen conditions, the excess of deformation stresses in the Ge crystal in area of the supports is substantial at the depth up to 25 μm and the distance of < 1.2 mm along the surface of the support. The performed theoretical calculations of stresses are in qualitative agreement with the distribution of the introduced structural defects in the surface layer and the electrical measurements of the structure-sensitive properties of the defect layer.

The used probe method for measuring τ allows a high level of local measurements and can be recommended for the control of the degree of imperfection in small fragments of integrated circuits in a production environment.

Fig. 1. Scheme of deformation of a plate by three-point bending (*a*) and distribution of the defects near the concentrators (*b*): 1 – Ge sample, 2 – acoustic radiator

Fig. 2. Stress distribution in the plate under the action of a concentrated force F

Fig. 3. Dependence of the total stress at the site of force application F at the distance x along the surface and deep into of the plate (the distance y , μm is marked on the curves)

Fig. 4. Dependence of lifetime τ_l of nonequilibrium charge carriers in the defect layer vs the distance x along the upper (1) and the lower (2) surfaces of the Ge plate: the points *a*, *c*, *e*, *f* mark the maximum concentration of defects in the surface layer; the points *b*, *d* mark unimportant structural defects. The inset shows the optical images of deformation defects