

# Оптический журнал

Физика полупроводников и элементы оптоэлектроники  
Semiconductor physics and optoelectronics elements

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-88-98

УДК 535.551:538.911

## Исследование влияния кристаллического совершенства на величину напряжений в структурах (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs с помощью генерации второй гармоники на основе фазового синхронизма

Михаил Федорович Ступак<sup>1</sup>, Сергей Алексеевич Дворецкий<sup>2</sup>✉,  
Николай Николаевич Михайлов<sup>3</sup>, Сергей Николаевич Макаров<sup>4</sup>,  
Андрей Григорьевич Елесин<sup>5</sup>

<sup>1, 4, 5</sup>Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>2, 3</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>stupak@tdsie.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0008-5624-801X>

<sup>2</sup>dvor@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

<sup>3</sup>mikhailov@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

<sup>4</sup>makarovsn@tdsie.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0007-6989-7978>

<sup>5</sup>elesin.andrei@tdsie.nsc.ru <https://orcid.org/0009-0005-4931-0792>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Механические напряжения в приповерхностном слое структуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs. **Цель работы.** Экспериментальная апробация нового чувствительного нуль-метода «на отражение» по выявлению слабого локального двулучепреломления и выявление данным методом основных характеристик остаточных механических напряжений в локальных областях приповерхностного варионного широкозонного слоя HgCdTe в составе структуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs. Анализ влияния кристаллического совершенства на величину остаточных механических напряжений. **Метод.** Регистрация характеристик сигнала второй гармоники, отражённого от поверхности вращающегося исследуемого образца лазерного ИК излучения, пропущенного через нелинейный кристалл, выставленный на синхронизм для поляризации, перпендикулярной поляризации лазерного излучения. **Основные результаты.** Разработан новый нуль-метод, основанный на возбуждении генерации второй гармоники в нелинейном кристалле LiJO<sub>3</sub> отражённого инфракрасного лазерного излучения от поверхности исследуемого образца импульсного YAG:Nd-лазера с длиной волны 1,064 мкм. Показано, что такой чувствительный метод позволяет получить информацию об анизотропии поляризации отражённого излучения, обусловленной остаточной деформацией кристаллической решётки. Получена величина амплитуды максимумов сигналов второй гармоники. Наблюдения тонкой структуры сигнала в максимумах сигнала второй гармоники свидетельствуют о сложном характере остаточных напряжений, связанных с наличием разориентированных участков. Проведены расчёты напряжений в приповерхностной области слоя HgCdTe состава  $x = 0,47$ , которые составили  $(-20,5 \pm 2)$  МПа. Величина сигнала ГВГ для слоёв HgCdTe более высокого кристаллического совершенства примерно в 1,5 раза меньше, чем для слоёв с пониженным качеством. Такие напряжения соответствуют величине приложенной силы в  $2,3 \times 10^{-3}$  Н. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты исследования остаточных напряжений с помощью разработанного нуль-метода

послужат основой для измерений остаточных напряжений в локальных областях поверхностных слоёв различных сложных многослойных структур как по площади, так и по толщине с послойным травлением, что позволит определять влияние параметров роста слоёв в процессе и после эпитаксии на возникающие напряжения и выявлять критические параметры технологического процесса.

**Ключевые слова:** механические напряжения, вторая гармоника, поляризация, генерация, структура HgCdTe

**Благодарность:** работа проводилась при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования от № 075-15-2020-797(13.1902.21.0024). Авторы выражают благодарность Бурдиной Л.Д. за химическую подготовку подложек (013)GaAs, Меньшикову Р.В. и Карташову В.А. за предэпитаксиальную подготовку подложек и выращивание буферных слоёв ZnTe и CdTe.

**Ссылка для цитирования:** Ступак М.Ф., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Макаров С.Н., Елесин А.Г. Локальный контроль и измерение слабых напряжений на поверхности структур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs с помощью генерации второй гармоники // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 88–98. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-88-98>

Коды OCIS: 160.6000, 190.2620, 190.4350.

## Investigation of the influence of crystal perfection on the magnitude of stresses in (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structures using second harmonic generation based on phase synchronism

MIKHAIL F. STUPAK<sup>1</sup>, SERGEY A. DVORETSKY<sup>2</sup>✉, NIKOLAI N. MIKHAILOV<sup>3</sup>,  
SERGEY N. MAKAROV<sup>4</sup>, ANDREI G. ELESIN<sup>5</sup>

<sup>1, 4, 5</sup>Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2, 3</sup>Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup>[stupak@tdsie.nsc.ru](mailto:stupak@tdsie.nsc.ru)

<https://orcid.org/0009-0008-5624-801X>

<sup>2</sup>[dvor@isp.nsc.ru](mailto:dvor@isp.nsc.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>

<sup>3</sup>[mikhailov@isp.nsc.ru](mailto:mikhailov@isp.nsc.ru)

<https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>

<sup>4</sup>[makarovsn@tdsie.nsc.ru](mailto:makarovsn@tdsie.nsc.ru)

<https://orcid.org/0009-0007-6989-7978>

<sup>5</sup>[elesin.andrei@tdsie.nsc.ru](mailto:elesin.andrei@tdsie.nsc.ru)

<https://orcid.org/0009-0005-4931-0792>

### Abstract

The subject of study is mechanical stresses in the surface layer of the HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structure. The aims of study are experimental testing of a new sensitive null reflection method for detection of weak local birefringence and identification by this method of the main characteristics of residual mechanical stresses in local regions of the near-surface graded wide gap HgCdTe layer in the (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs. Analysis of the influence of crystalline perfection on the magnitude of residual mechanical stresses. Method. Registration of the characteristics of the second harmonic signal of the laser IR radiation reflected from the surface of the rotating sample under study, passed through a nonlinear crystal, exposed to synchronism for the polarization perpendicular to the polarization of the laser radiation. Main results. The new null method based on the excitation of second harmonic generation in a nonlinear LiJO<sub>3</sub> crystal reflected from the surface of infrared laser radiation of a pulsed YAG:Nd laser with a wavelength of 1.064 μm has been developed. It is shown that such a sensitive method allows obtaining information on the anisotropy of the polarization of the reflected radiation due to residual deformation. The magnitude of the amplitude of the second harmonic signals maxima is obtained. Observations of fine structure in the maxima of the second harmonic signal

indicate a complex structure of residual stresses associated with the presence of disoriented regions. Calculations of stresses in the near-surface region of the HgCdTe layer of composition  $x = 0.47$ , which amounted to  $(-20.5 \pm 2)$  MPa, were carried out. The magnitude of the SHG signal for HgCdTe layers of higher crystalline perfection is about 1.5 times smaller than that for layers with reduced quality. Such stresses correspond to the value of the applied force of  $2.3 \times 10^{-3}$  N. **Practical significance.** The results of the residual stresses investigation with the help of the developed null method will serve as a basis for measurements of the residual stresses in the local areas of surface layers of various complex multilayer structures both by area and thickness with layer-by-layer etching, which will make it possible to determine the influence of layer growth parameters in the process and after epitaxy on the arising stresses and to identify critical parameters of the technological process.

**Keywords:** mechanical stresses, second harmonic, polarization, generation, HgCdTe structure

**Acknowledgment:** the work was financially supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education № 075-15-2020-797(13.1902.21.0024). The authors would like to thank Burdina L.D. for chemical preparation of (013)GaAs substrates, Menshikov R.V. and Kartashov V.A. for pre-epitaxial preparation of the substrates and growth of ZnTe and CdTe buffer layers.

**For citation:** Stupak M.F., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Makarov S.N., Elesin A.G. Local control and measurement of weak stresses on the surface of (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structures using second harmonic generation [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 88–98. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-90-05-88-98>

**OCIS codes:** 160.6000, 190.2620, 190.4350.

## ВВЕДЕНИЕ

Гетеро- и наноструктуры на основе элементарных полупроводников, соединений и твёрдых растворов  $A_3B_5$  и  $A_2B_6$  определяют развитие направлений в СВЧ и оптоэлектронике, для которых требуются подложки большой площади, такие как Si, соединения GaAs, InP, GaP, CdTe, ZnTe и другие. Кристаллическое совершенство таких структур зависит от соответствия параметров сопрягаемых материалов и коэффициентов термического расширения плёнки, которое определяется остаточными напряжениями, и оказывает существенное влияние на характеристики приборов и их деградацию в процессе эксплуатации.

Величину механических напряжений можно измерить с помощью оптических методов по изгибу структуры [1] и методом рентгеновской дифракции [2], который позволил определить величину напряжения и поворот плоскости ориентации InGaAs при выращивании на подложках (001)GaAs  $(001) \pm 1^\circ$  [3], как и при использовании модели триклинических искажений [4] или при сравнении экспериментальных и расчётных данных рентгеновского рассеяния в обратном пространстве [5]. Достаточно большое количество чувствительных и информативных методик рентгеновской дифракции позволяют получить величину механических напряжений от больших объёмов кристал-

ла, требует эталонов и должны проводиться в условиях радиационной защиты. Для получения экспрессной информации о кристаллическом состоянии и механических напряжениях многослойных структур при отработке технологии метод генерации второй гармоники (ГВГ) обеспечивает высокую чувствительность и скорость измерений в малом объёме материала, что особенно важно для наноструктур. Так, сравнения экспериментальных и модельных азимутальных зависимостей сигнала ГВГ [6] от слоёв и подложки структуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs позволили выявить остаточные напряжения и повороты кристаллической решётки слоёв в плоскости и направлении роста [7]. Однако такая методика даёт качественную картину о механических напряжениях, имеет ограничения, связанные с необходимостью учёта ориентации структуры для расчётов модельной зависимости, которые приводятся в виде графиков [7].

Разработанный ранее метод на основе регистрации характеристик сигнала второй гармоники зондирующего лазерного ИК излучения, возбуждаемой в нелинейном кристалле при использовании фазового синхронизма, позволяет проводить контроль слабых напряжений в объёме как аморфных, так и кристаллических сред [8]. Такой нуль-метод «на просвет» [8] позволил получать интегральную информа-

мацию о качественном распределении объёмных деформаций по площади пластин GaAs и Si с высокой чувствительностью, локальностью и высокой скоростью. Данный метод продемонстрировал лишь высокую чувствительность обнаружения деформаций при использовании фазового синхронизма, так как за рамками сообщения остался вопрос о выборе ориентации поляризации лазерного излучения относительно кристаллофизических осей картируемых образцов и, как следствие, вопрос о величине, ориентации и распределении по объёму напряжений.

Нами разработан новый локальный нуль-метод «на отражение», взяв от метода [8] высокую чувствительность за счёт фазового синхронизма и, заставив образец вращаться в плоскости, перпендикулярной волновому вектору падающего лазерного излучения, пропустили отражённое лазерное излучение через нелинейный кристалл, ориентированный на синхронизм для перпендикулярной лазерному излучению поляризации. Таким образом, по характеристикам сигнала ГВГ из нелинейного кристалла (амплитуды и угла ориентации) мы сумели получить ряд количественных параметров напряжений в приповерхностных слоях исследуемых образцов.

Целью настоящего сообщения является экспериментальная апробация нового чув-

ствительного нуль-метода «на отражение» по выявлению слабого локального двулучепреломления и экспериментальное измерение данным методом основных характеристик остаточных механических напряжений в локальных областях приповерхностного варизонного слоя HgCdTe в составе структуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs.

Проведено исследование влияния кристаллического совершенства на величину остаточных напряжений.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Методика измерений

Принципиальная схема нового нуль-метода «на отражение» для измерений механических напряжений по измерениям сигнала при ГВГ в нелинейном кристалле отражённого инфракрасного (ИК) излучения приведена на рис. 1.

В разработанном ранее нуль-методе [8] «на пропускание» зондирующее лазерное излучение должно проходить через объём исследуемого образца без значительного поглощения. Для полупроводников энергия зондирующего лазерного излучения должна быть меньше ширины запрещённой зоны. Такой нуль-метод «на пропускание» позволяет получить интегральную информацию о механических

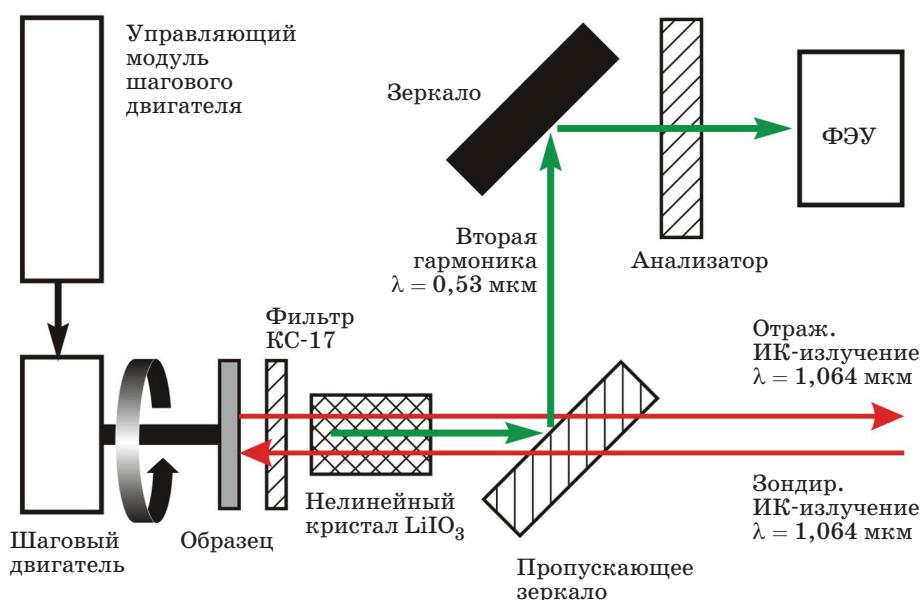


Рис. 1. Принципиальная схема нового нуль-метода

Fig. 1. Schematic diagram of the new null method

напряжениях во всем объёме образца. В новом нуль-методе, напротив, энергия зондирующего лазерного излучения должна превышать ширину запрещённой зоны исследуемого образца. В этом случае зондирующее лазерное излучение поглощается, и информация о механических напряжениях обеспечивается отражённым излучением. Таким образом, нуль-метод «на отражение» даёт возможность проведения контроля и измерения в малом объёме вещества. Проводя послойное измерение, можно получить информацию о распределении механических напряжений в объёме. Следовательно, новый нуль-метод даёт дифференциальную информацию о механических напряжениях подобно методу Петрица для послойного измерения концентрации и подвижности носителей.

На поверхность вращающегося образца, закреплённого на валу шагового двигателя (ШД), по нормали падает линейно поляризованное зондирующее ИК лазерное излучение. Отражённое ИК излучение пропускается через нелинейный кристалл, ориентированный на синхронизм типа (oo-e) для поляризации, перпендикулярной поляризации лазерного излучения. В присутствии слабых напряжений в образце поляризация отражённого ИК излучения становится эллиптической, что приводит к ГВГ в нелинейном кристалле.

Для исследований слабых напряжений в приповерхностном слое в качестве источника зондирующего излучения используется импульсно-периодический YAG:Nd-лазер с одной накачкой DUETTO-OEM V3.4 с длиной волны 1,064 мкм, частотой повторения цуга из 10 импульсов 50 кГц при длительности одного импульса в цуге около 10 пс. Излучение лазера фокусируется длиннофокусной линзой в области нелинейного кристалла в пятно диаметром почти 200 мкм, так чтобы на образце его размер не превышал 400 мкм. Между образцом и параметрическим зеркалом помещён нелинейный кристалл LiJO<sub>3</sub>, настроенный на нулевой сигнал ГВГ от выбранной поляризации падающего лазерного излучения. Фильтр КС-17 предназначен для подавления отражённого сигнала ГВГ, полученного в исследуемом образце. Специализированное параметрическое зеркало, расположенное под углом 45°, пропускает отражённое ИК излучение и отражает сигнал ГВГ в измерительный тракт.

Он состоит из полностью отражающего зеркала, анализатора и далее через светофильтр по световоду направляет сигнал второй гармоники на ФЭУ-130. Сигнал с ФЭУ поступает на селективный усилитель — нановольтметр UNIPAN-233, синхронизированный с частотой лазера, и, далее, на модуль АЦП с непрерывной обработкой специализированным программным обеспечением персонального компьютера.

Развёртка сигнала с ФЭУ на приводимых ниже графиках была постоянной и составляла 51 с. Стандартное отклонение сигнала шума (с нулевым средним) соответствовало примерно 16 единицам кода АЦП. Уровень характерной амплитуды сигнала ГВГ на графиках находился в пределах 2000 – 7000 единиц кода АЦП.

Для калибровки сигнала ГВГ использовался образец аморфного слоя хрома, осажденного в вакууме на стеклянную пластину. Проведены измерения сигналов ГВГ при приложении краевой нагрузки [9]. Без краевой нагрузки в сигнале ФЭУ наблюдаются лишь шумы измерительного тракта стенда величиной 400 единиц счёта, что соответствует нулевому сигналу ГВГ. При повороте образца на 360 градусов сигнал ФЭУ остается неизменным и постоянным. При приложении краевой нагрузки 10<sup>-2</sup> Н в перпендикулярном направлении поверхности образца в развертке ФЭУ наблюдается появление симметричных пиков сигнала, величиной 3600 и 4150 единиц счёта, связанных с ГВГ в области синхронизма нелинейного кристалла, которое обусловлено возникновением эллиптической поляризации в отраженном ИК излучении и свидетельствует о появлении напряжений в слое хрома. Увеличение краевой нагрузки в 1.5 раза приводит к увеличению величины пиков до 4400 и 5800 единиц счета, что свидетельствует об увеличении напряжений в слое хрома. При снятии нагрузки измеряемый сигнал ФЭУ соответствовал значениям шума измерительного такта, совпадающим по величине с начальными значениями, что свидетельствует о ненапряжённом состоянии слоя хрома. Амплитуда пиков имеет линейную зависимость от величины приложенной нагрузки, определяемой калибровочной зависимостью как

$$Y = 3,5 \times 10^5 X + 428,5, \quad (1)$$

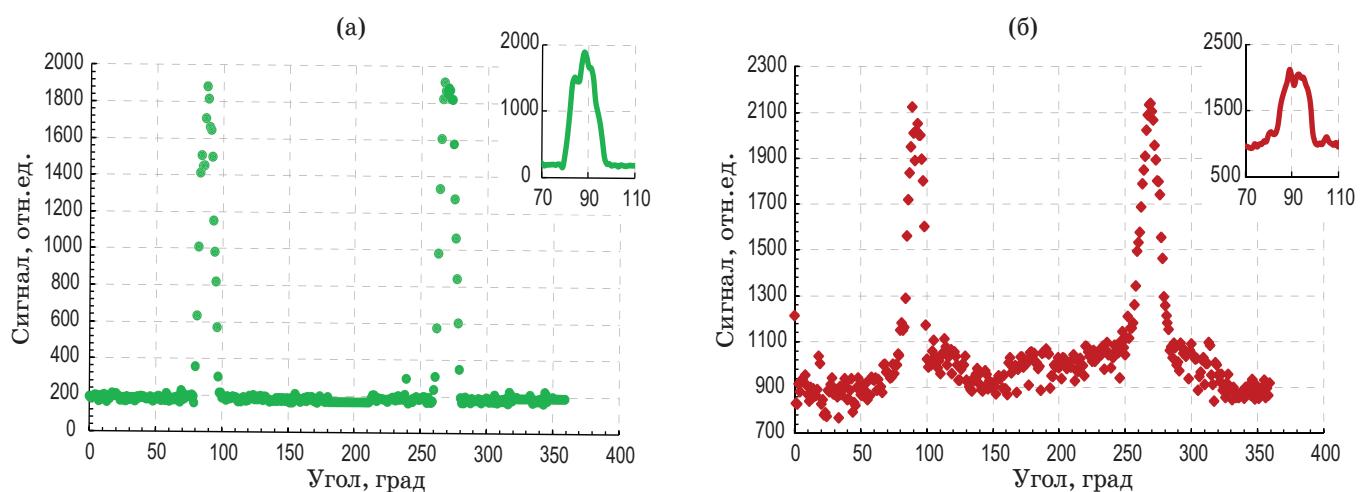
где  $Y$  — величина сигнала ГВГ,  $X$  — нагрузка в Н. Таким образом, разработанный нуль-метод имеет высокую чувствительность к выявлению слабых напряжений и позволяет проводить измерения их величин по калибровочной зависимости.

### Гетероструктура (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs

Исследования сигнала ГВГ с помощью нуль-метода проводились на поверхности гетероэпитаксиальных структур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs 1MCT170622 и MCT180130, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, которая включает буферные слои ZnTe и CdTe и слой  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  с варизонными широкозонными слоями на границах однородного слоя состава  $x$  порядка 0,23 на подложке (013)GaAs. Распределение состава в слоях  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  для гетероструктур приведено в [7]. Состав верхнего варизонного широкозонного слоя на поверхности составлял  $x$  порядка 0,47.

На рис. 2 приведены типичные графики сигнала ГВГ (развёртка сигнала ФЭУ) от поверхности образцов 1MCT170622 (рис. 2а) и 1MCT180130 (рис. 2 б). На вставке к рис. 2а, 2б приведена форма сигналов ФЭУ вблизи 90 градусов угла поворота.

На приведенных графиках сигналов наблюдаются 2 узких максимума сигнала ГВГ: в районе 90–95 и 270–275 градусов развёртки. Максимумы сигнала имеют практически симметричную форму для образца 1MCT170622 (рис. 2а) и несимметричную форму сигнала для 1MCT180130, что более отчетливо видно на вставках к рис. 2б). Равномерный сигнал между максимумами принимается за нулевой уровень отсчета. Следует отметить, что значение величины сигнала в максимумах для образца 1MCT170622 составляет порядка 1600–1700 единиц счёта и для образца 1MCT180130 порядка 1200 единиц счёта. Наблюдаемые особенности максимумов и их различие по форме соответствуют ориентации образца в исследуемой области, при которой в отражённом излучении появляется перпендикулярная составляющая поляризации к поляризации падающего лазерного излучения (появление соответствует направлению поляризации падающего лазерного излучения вдоль плоскости скола образца). Полученные экспериментальные зависимости свидетельствуют о том, что практически весь сигнал ГВГ в максимумах развёртки ФЭУ соответствует слабой анизотропии кристаллической структуры исследуемого приповерхностного слоя образца толщиной порядка 200 нм,



**Рис. 2.** Графики развёртки экспериментальных значений сигнала ГВГ от образцов 1MCT170622 (а) и 1MCT180130 (б). На вставках — тонкая структура сигнала ФЭУ в районе 90 градусов. Расстояние между максимумами соответствует 180 градусам поворота образца. Полуширина пиков составляет 10–17 градусов

**Fig. 2.** Experimental SHG from the samples 1MCT170622 (a) and 1MCT180130 (b). In inset – the SHG signal fine structure in the region of 90 degrees. The distance between maxima corresponds to 180 degrees of sample rotation. The half-width of the peaks is 10–17 degrees

связанной со слабыми напряжениями. Величина углового диапазона (при вращении образца) на полувысоте максимума регистрируемого сигнала ВГ составляет 8–16 градусов поворота. Контрольные эксперименты с пластинкой кварца (оптическая ось лежит в плоскости среза) выявили такую же угловую направленность сигнала ГВГ. Следовательно, причина такой узкой направленности сигнала второй гармоники объясняется высокой угловой чувствительностью применяемого нуль-метода. Аналитическое исследование формы получаемого сигнала ГВГ в применяемом нуль-методе не предусмотрено в рамках настоящего сообщения.

Наблюдаемые различия амплитуды и формы сигналов ГВГ при повороте образца на 180 градусов обусловлены, по-видимому, формированием различного эллиптически поляризованного отражённого ИК излучения при зондировании лазерным лучом близких, но разных локальных областей в исследуемой поверхности образцов, что связано со слабым децентрированием зондирующего лазерного луча относительно оси вращения образца. В данном случае размер исследуемой области не превышает 1000 мкм при диаметре зондирующего излучения 400 мкм. Наблюданная тонкая структура сигнала ГВГ связана со сложной структурой деформаций в приповерхностном слое образца. Среднее значение напряжений, полученных из калибровочной зависимости (1), соответствует приложенной краевой нагрузке  $3,6 \times 10^{-3}$  Н для образца 1MCT170622 и  $2,3 \times 10^{-3}$  Н для образца 1MCT180130.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как было показано ранее, исследования азимутальной зависимости ГВГ от поверхностных слоёв и подложки структуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs позволило качественно выявить напряжения по асимметричной форме сигналов [7]. Из этих зависимостей также следовало, что наблюдаемые повороты ориентации в плоскости роста в слоях HgCdTe для структуры 1MCT170622 ожидали на 8–10 град. меньше, чем для структуры 1MCT180130. Однако, принимая во внимание различие в интенсивности амплитуды ГВГ для исследуемых структур, можно утверждать,

что для структуры 1MCT170622 кристаллическое совершенство слоя HgCdTe ниже, чем для структуры 1MCT180130. Действительно, это следует из рассмотрения изменения параметров слоя HgCdTe в процессе роста. Наблюдаемое ухудшение морфологии слоя образца 1MCT170622 связано с развитием ростовой поверхности связанных с изменением двухмерного на трехмерный механизм роста, что приводит к образованию дефектов. Для образца 1MCT180130 морфология поверхности оставалась неизменной в соответствии с двухмерным механизмом роста. Таким образом, структурное качество слоев HgCdTe исследуемых образцов было различным — с более высоким качеством для образца 1MCT180130. Классическое представление возникающих напряжений ( $\sigma_{\text{residual}}$ ) при выращивании многослойных структур с различными параметрами кристаллической решётки связывают с несоответствием параметров решётки ( $\sigma_{\text{res-misf}}$ ) и коэффициентов теплового расширения ( $\sigma_{\text{therm}}$ ) [9]:

$$\sigma_{\text{residual}} = \sigma_{\text{res-misf}} + \sigma_{\text{therm}}. \quad (2)$$

Расчёт  $\sigma_{\text{res-misf}}$  проводился по уравнению

$$\sigma_{\text{ris\_misf}} = (Ef(h_c/h))/(1 - v), \quad (3)$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $f = (a_{\text{layer}} - a_{\text{substrate}})/a_{\text{substrate}}$  — параметр несоответствия,  $a_{\text{layer}}$  и  $a_{\text{substrate}}$  — постоянные кристаллической решётки слоя и подложки,  $h_c$  — толщина псевдомоффного слоя,  $h$  — толщина выращенного слоя,  $v$  — коэффициент Пуассона.

Расчёт равновесного значения толщины псевдоморфного слоя ( $h_c$ ) проведён по формуле Мэттьюза [10]:

$$h_c = b(1 - v \cos 2\alpha) \times \\ \times [\ln(h_c/b) + 1]/[8\pi f \cos \lambda (1 + v)], \quad (4)$$

где  $\alpha$  — угол между вектором Бюргерса  $\mathbf{b}$  и дислокационной линией,  $\lambda$  — угол между вектором Бюргерса и направлением, лежащим в границе раздела перпендикулярно дислокации несоответствия (ДН). Расчёты  $h_c$  проведены для температуры роста 180 °С. Значения для углов  $\alpha$  и  $\lambda$  составляют 79,1 и 44,2 градуса для системы 1–2 скольжения дислокаций [11]. Значения  $a_{\text{substrate}}$  ( $x$  равно 0,23) равно

Значения упругих постоянных и температурных коэффициентов  
Elastic constants and temperature coefficients

| Соединение | Упругие постоянные, ГПа |          |          | $\alpha_c$ , ГПа/К |          |          |
|------------|-------------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|
|            | $C_{11}$                | $C_{12}$ | $C_{44}$ | $C_{11}$           | $C_{12}$ | $C_{44}$ |
| CdTe       | 53,6                    | 37,0     | 20,1     | 0,011              | 0,009    | 0,002    |
| HgTe       | 54,1                    | 37,4     | 20,8     | 0,020              | 0,016    | 0,006    |

0,6469 нм и  $a_{\text{layer}}$  ( $x$  равно 0,47) равно 0,6473 нм, определены с учётом их зависимости от температуры и состава в соответствии с формулой [12]:

$$a(x, T) = 6,4614 + 0,008x + \\ + 0,0168x^2 - 0,0057x^3 + \\ + (-0,0095 + 2,613 \times 10^{-5}T + 1,131 \times 10^{-8}T) \quad (5)$$

Расчёт модуля Юнга  $E$  проведён по формуле [13]:

$$1/E = (C_{11} + C_{12})/(C_{11} - 2C_{12}) + \\ + (1/C_{44} - 1/(C_{11} - 12)) \times \\ \times (N_x^2 N_y^2 + N_x^2 N_z^2 + N_y^2 N_z^2), \quad (6)$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  и  $C_{44}$  — упругие постоянные;  $N_x$ ,  $N_y$  и  $N_z$  — направляющие косинусы.

Расчёт упругих постоянных при температурах роста проводился в предположении линейной зависимости упругих постоянных от температуры в соответствии с [12]:

$$C_{ij}(T) = C_{ij}(300) + \alpha_c(300 - T). \quad (7)$$

Значения упругих постоянных  $C_{ij}$  и их температурных коэффициентов  $\alpha_c$  приведены в таблице.

Значения  $v = 0,365$  при 180 °C.

Расчёт остаточных напряжений при охлаждении выращенной структуры проводился по формуле для слоя HgTe в составе структуры HgTe/CdTe/ZnTe/GaAs:

$$\sigma_{\text{therm}} = (E \Delta \alpha_T \Delta T) / (1 - v), \quad (8)$$

где  $\Delta \alpha_T = \alpha_{\text{HgCdTe}} - \alpha_{\text{GaAs}}$ ,  $\alpha_{\text{HgCdTe}}$  и  $\alpha_{\text{GaAs}}$  — коэффициенты теплового расширения HgCdTe и GaAs,  $\Delta T$  — температурный интервал охлаждения до комнатной температуры. Расчёт

напряжений для многослойной структуры может быть выполнен для каждого слоя [14].

Расчёт показал, что равновесное значение  $h_c = 0,226$  мкм, которое почти в 2 раза меньше толщины верхнего варизонного слоя. Расчёт напряжений, связанных с несоответствием параметров решёток, с учётом формул (3), (6) и значения  $v = 0,365$ , полученного по процедуре, приведённой в [12], показал, что величина составляет 19,5 МПа. В случае кинетических ограничений  $h_c$  может превышать толщину верхнего варизонного слоя HgCdTe [15]. Для такого случая, когда толщина варизонного слоя будет равна толщине псевдоморфного слоя, напряжения составят предельную величину 35 МПа.

Для слоя HgCdTe с  $x = 0,47$  при охлаждении от 180 °C до комнатной температуры для коэффициентов теплового расширения  $\alpha_{\text{HgCdTe}}(x = 0,47) = 5,1 \times 10^{-6}$  1/K [16],  $\alpha_{\text{HgCdTe}} = 5,9 \times 10^{-6}$  1/K [17] и  $\alpha_{\text{GaAs}} = 5,8 \times 10^{-6}$  1/K [18] получаем значение остаточных напряжений 3 МПа и 1 МПа, соответственно.

Таким образом, остаточные механические напряжения с учётом релаксации постоянной решётки при толщине, большей критической, при росте и охлаждении после роста составят  $\sigma_{\text{residual}} = (-20,5 \pm 2,0)$  МПа, что соответствует значению приложенной силы в  $2,3 \times 10^{-3}$  Н, которое следует из измеренной величины сигнала ГВГ с помощью разработанного нуль метода и калибровочной зависимости по формуле (1). Такое значение соответствует слою HgCdTe в составе структуры 1MCT180130 высокого структурного совершенства. Для структуры 1MCT170622 величина остаточных напряжений должна быть выше и составляет величину  $(-28,0 \pm 2,0)$  МПа, что соответствует величине приложенной силы в  $3,6 \times 10^{-3}$  Н. Повышенная величина напряжения в этом случае определяется введением не только дислокаций несоответствия как для образца 1MCT180130,

но и образованием других дефектов роста, возможно таких как двойниковые ламели, повышенная концентрация V-дефектов или характерных поверхностных дефектов [20, 21].

В дальнейшем, более детальные исследования позволяют связать влияние конкретного типа дефекта на величину напряжений, которые возникают при заданных условиях роста.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый нуль-метод, основанный на возбуждении генерации второй гармоники в нелинейном кристалле  $\text{LiJO}_3$  отражённого от поверхности инфракрасного лазерного излучения импульсного YAG:Nd-лазера с длиной волны 1,064 мкм. Показано, что такой чувствительный метод позволяет получить информацию об анизотропии поляризации отражённого излучения, обусловленной

остаточной деформацией. Получена величина амплитуды максимумов сигналов второй гармоники от образцов с различным кристаллическим совершенством. Показано, что амплитуда в максимумах сигнала второй гармоники для образцов с дефектной структурой меньше, чем для образцов с высоким структурным совершенством. Из расчетов напряжений в приповерхностной области слоя  $\text{HgCdTe}$  состава  $x = 0,47$  следует, что величина остаточных напряжений составила  $(-20,5 \pm 2)$  МПа и  $(-28,0 \pm 2)$  МПа для образцов высокого структурного совершенства и с повышенной дефектностью, соответственно.

Полученные в работе результаты исследования остаточных напряжений, с помощью разработанного нуль-метода, показали возможность их детального контроля для различных материалов, в том числе слое в сложных многослойных структурах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сен'ко С.Ф., Зеленин В.А. Измерение локальных остаточных напряжений в полупроводниковых кремниевых структурах // Приборы и методы измерений. 2018. Т.9. №3. С. 254–262. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262>
2. Hattanda T., Takeda A. Direct measurement of internal strains in liquid phase epitaxial garnet film on Gadolinium Gallium Garnet (111) plate // Jpn. J. Appl. Phys. 1973. V. 12. № 7. P. 1104. <http://doi.org/10.1143/JJAP.12.1104>
3. Nagai H. Structure of vapor-deposited  $\text{GaxIn}_{1-x}\text{As}$  crystals // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 3789–3794. <https://doi.org/10.1063/1.1663861>
4. Колесников А.В., Ильин А.С., Труханов Е.М., Василенко А.П., Лошкарев И.Д., Дерябин А.С. Рентгено-дифракционный анализ искажений эпитаксиальной пленки на отклоненных подложках (001) // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 5. С. 652–655.
5. Лошкарев И.Д., Василенко А.П., Труханов Е.М., Колесников А.В., Путято М.А., Есин М.Ю., Петрушков М.О. Структурное состояние эпитаксиальных пленок  $\text{GaP}$  разных полярностей на отклоненных подложках  $\text{Si}(001)$  // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 4. С. 64–70. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.04.44299.16494>
6. Ступак М.Ф., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Макаров С.Н., Елесин А.Г., Верхогляд А.Г. Высокочувствительная экспрессная нелинейно-оптическая диагностика кристаллического состояния гетероструктур типа сфалерита // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1799–1808. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.11.51546.34-21>
7. Дворецкий С.А. Ступак М.Ф., Михайлов Н.Н., Макаров С.Н., Елесин А.Г., Верхогляд А.Г. Исследование кристаллического состояния слоев молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур (013) $\text{HgCdTe}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$  методом генерации
8. Sen'ko S.F., Zelenun V.A. Measurement of localized residual stresses in silicon semiconductor structures // Instruments and measurement methods. 2018. V. 9. № 3. P. 254–262. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262>
9. Hattanda T., Takeda A. Direct measurement of internal strains in liquid phase epitaxial garnet film on Gadolinium Gallium Garnet (111) plate // Jpn. J. Appl. Phys. 1973. V. 12. № 7. P. 1104. <http://doi.org/10.1143/JJAP.12.1104>
10. Nagai H. Structure of vapor-deposited  $\text{GaxIn}_{1-x}\text{As}$  crystals // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 3789–3794. <https://doi.org/10.1063/1.1663861>
11. Kolesnikov A.V., Ilin A.S., Trukhanov E.M. et al. X-ray diffraction analysis of epitaxial film distortions on miscut substrates (001) // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. 609–612. <https://doi.org/10.3103/S1062873811050273>
12. Loshkarev I.D., Vasilenko A.P., Trukhanov E.M., Kolesnikov A.V., Putyato M.A., Esin M.Yu., Petrushkov M.O. The structural state of epitaxial  $\text{GaP}$  films of different polarities grown on miscut  $\text{Si}(001)$  substrates // Tech. Phys. Lett. 2017. V. 43. P. 213–215. <https://doi.org/10.1134/S1063785017020225>
13. Stupak M.F., Mikhailov N.N., Dvoretsky S.A., Makarov S.N., Yelesin A.G., Verhoglyad A.G. Highly sensitive express nonlinear optical diagnostics of the crystalline state of heterostructures such as sphalerite // Technical Physics. 2022. V. 67. № 14. P. 2290–2298. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.14.55233.34-21>
14. Dvoretzky S.A., Stupak M.F., Mikhailov N.N., Makarov S.N., Elesin A.G., Verhoglyad A.G. Study of the crystalline state of MBE (013) $\text{HgCdTe}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$  heterostructure layers by the second harmonic generation method // Semiconductors. 2022. V. 56.

- второй гармоники // ФТП. 2022. Т. 56. Вып. 8. С. 780–787. <https://doi.org/10.21883/FTP.2022.08.53145.31>
8. Мушер С.Л., Ступак М.Ф., Сыскин В.С. Использование фазового синхронизма в качестве нуль-метода для сканирования полей объемных деформаций в полупроводниковых материалах // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. Вып. 8. С. 762–764.
9. Stupak M.F., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Makarov S.N., Elesin A.G. Local measurement of weak stresses on the surface of HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structures using the null method // JAP. 2023. V. 134. P. 185102. <https://doi.org/10.1063/5.0167306>
10. Matthews J.W. Defects associated with the accommodation of misfit between crystals // J. Vac. Sci. Technol. 1975. V. 12. P. 126–133. <https://doi.org/10.1116/1.568741>
11. Сидоров Ю.Г., Якушев М.В., Варавин В.С., Колесников А.В., Труханов Е.М., Сабинина И.В., Лошкевич И.Д. Плотность дислокаций в гетероэпитаксиальных структурах CdHgTe на подложках из GaAs и Si ориентации (013) // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 11. С. 2095–2101.
12. Berding M.A., Nix W.D., Rhiger D.R., Sen S., Sheer A. Critical thickness in the HgCdTe/CdZnTe system // J. Electron. Mater. 2000. V. 29. P. 676–679. <https://doi.org/10.1007/s11664-000-0204-3>
13. Kurilo I.V., Alekhin V.P., Rudyi I.O., Bulychev S.I., Osypushin L.I. Mechanical properties of ZnTe, CdTe, CdHgTe and HgTe crystals from micromechanical investigation // Phys. Stat. Sol. (a). 1997. V. 163. P. 47–58.
14. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях // ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 12. С. 1971–1994. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.12.50417.38-20>
15. Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П., Чикичев С.И. Кремний-германиевые эпитаксиальные пленки: физические основы получения напряженных и полностью релаксированных гетероструктур // УФН. 2001. Т. 171. № 7. С. 659–715.
16. Skauli T., Haakenaasen R., Colin T. Thermal expansion behavior of CdHgTe epitaxial layers on CdZnTe substrates // J. Cryst. Growth. 2002. V. 241. P. 39–44.
17. Gergaud P., Jonchere A., Amstatt B., Baudry X., Brelleur D., Ballet P. X-ray diffraction investigation of thermoelastic properties of HgCdTe/CdZnTe structures // J. Electr. Mat. 2012. V. 41. № 10. P. 2694–2699. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2240-1>
18. Yang V.K., Groenert M., Leitz C.W., Pitera A.J., Currie M.T., Fitzgerald E.A. Crack formation in GaAs heteroepitaxial films on Si and SiGe virtual substrates // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. № 7. P. 3859–3865. <https://doi.org/10.1063/1.1558963>
19. Smirnov A.B. Residual stresses and piezoelectric properties of the HgCdTe – based compound heterostructures under the anisotropic deformation restriction // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2012. V. 15. № 2. P. 170–175. PACS 72.40.+w; 77.65.Ly; 81.05.Dz
20. Sabinina I.V., Gutakovskiy A.K., Sidorov Yu.G., Latyshev A.V. Nature of V-shaped defects in HgCdTe epilayers grown by molecular beam epitaxy // J. Crystal Growth. 2005. V. 274. P. 339–346. PACS: 61.30.Hn; 68.55.Ln; 68.37.Lp; 68.37.Ps
21. He L., Wu Y., Chen L., Wang S.L., Yu M.F., Qiao Y.M., Yang J.R., Li Y.J., Ding R.J., Zhang Q.Y. Composition control and surface defects of MBE-grown HgCdTe // J. Crystal Growth. 2001. V. 227–228. P. 677–682. PACS: 81.15.Ef; 81.40.Ef; 78.66.Hf
- № 8. P. 562–569. <https://doi.org/0.21883/SC.2022.08.54114.31>
8. Musher S.L., Stupak M.F., Syskin V.S. The use of phase matching as the null method for scanning bulk deformation fields in semiconductor materials // Quantum Electron. 1995. V. 26. № 8. P. 183–187.
9. Stupak M.F., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N., Makarov S.N., Elesin A.G. Local measurement of weak stresses on the surface of HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs structures using the null method // JAP. 2023. V. 134. P. 185102. <https://doi.org/10.1063/5.0167306>
10. Matthews J.W. Defects associated with the accommodation of misfit between crystals // J. Vac. Sci. Technol. 1975. V. 12. P. 126–133. <https://doi.org/10.1116/1.568741>
11. Sidorov Y.G., Yakushev M.V., Varavin V.S. et al. Density of dislocations in CdHgTe heteroepitaxial structures on GaAs(013) and Si(013) substrates // Phys. Solid State. 2015. V. 57. P. 2151–2158. <https://doi.org/10.1134/S1063783415110311>
12. Berding M.A., Nix W.D., Rhiger D.R., Sen S., Sheer A. Critical thickness in the HgCdTe/CdZnTe system // J. Electron. Mater. 2000. V. 29. P. 676–679. <https://doi.org/10.1007/s11664-000-0204-3>
13. Kurilo I.V., Alekhin V.P., Rudyi I.O., Bulychev S.I., Osypushin L.I. Mechanical properties of ZnTe, CdTe, CdHgTe and HgTe crystals from micromechanical investigation // Phys. Stat. Sol. (a). 1997. V. 163. P. 47–58.
14. Shugurov A.R., Panin A.V. Mechanisms of stress generation in thin films and coatings // Tech. Phys. 2020. V. 65. P. 1881–1904. <https://doi.org/10.1134/S1063784220120257>
15. Bolkhovityanov Yu.B., Pchelyakov O.P., Chikichev S.I. Silicon-germanium epilayers: physical fundamentals of growing strained and fully relaxed heterostructures // Phys. Sup. 2001 V. 44. № 9. P. 655–680. <https://doi.org/10.1070/ps2001v04n07abeh000879>
16. Skauli T., Haakenaasen R., Colin T. Thermal expansion behavior of CdHgTe epitaxial layers on CdZnTe substrates // J. Cryst. Growth. 2002. V. 241. P. 39–44.
17. Gergaud P., Jonchere A., Amstatt B., Baudry X., Brelleur D., Ballet P. X-ray diffraction investigation of thermoelastic properties of HgCdTe/CdZnTe structures // J. Electr. Mat. 2012. V. 41. № 10. P. 2694–2699. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2240-1>
18. Yang V.K., Groenert M., Leitz C.W., Pitera A.J., Currie M.T., Fitzgerald E.A. Crack formation in GaAs heteroepitaxial films on Si and SiGe virtual substrates // J. Appl. Phys. 2003. V. 93. № 7. P. 3859–3865. <https://doi.org/10.1063/1.1558963>
19. Smirnov A.B. Residual stresses and piezoelectric properties of the HgCdTe – based compound heterostructures under the anisotropic deformation restriction // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2012. V. 15. № 2. P. 170–175. PACS 72.40.+w; 77.65.Ly; 81.05.Dz
20. Sabinina I.V., Gutakovskiy A.K., Sidorov Yu.G., Latyshev A.V. Nature of V-shaped defects in HgCdTe epilayers grown by molecular beam epitaxy // J. Crystal Growth. 2005. V. 274. P. 339–346. PACS: 61.30.Hn; 68.55.Ln; 68.37.Lp; 68.37.Ps
21. He L., Wu Y., Chen L., Wang S.L., Yu M.F., Qiao Y.M., Yang J.R., Li Y.J., Ding R.J., Zhang Q.Y. Composition control and surface defects of MBE-grown HgCdTe // J. Crystal Growth. 2001. V. 227–228. P. 677–682. PACS: 81.15.Ef; 81.40.Ef; 78.66.Hf

**АВТОРЫ**

**Михаил Федорович Ступак** — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630058, Россия; Scopus ID: 6701804499; <https://orcid.org/0009-0008-5624-801X>; stupak@tdsie.nsc.ru

**Сергей Алексеевич Дворецкий** — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 6701661877; <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>; dvor@isp.nsc.ru

**Николай Николаевич Михайлов** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 7006462618; <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>; mikhailov@isp.nsc.ru

**Сергей Николаевич Макаров** — старший научный сотрудник, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630058, Россия; Scopus ID: 57210786734; <https://orcid.org/0009-0007-6989-7978>; makarovsn@tdsie.nsc.ru

**Андрей Геннадьевич Елесин** — ведущий инженер, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630058, Россия; Scopus ID: 57204198107; <https://orcid.org/0009-0005-4931-0792>; elesin.andrei@tdsie.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2023  
Одобрена после рецензирования 18.10.2023  
Принята к печати 29.12.2023

**AUTHORS**

**Mikhail F. Stupak** — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering at the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630058, Russia; Scopus ID: 6701804499; <https://orcid.org/0009-0008-5624-801X>; stupak@tdsie.nsc.ru

**Sergey A. Dvoretsky** — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 6701661877; <https://orcid.org/0000-0002-1295-5598>; dvor@isp.nsc.ru

**Nikolay N. Mikhailov** — Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 7006462618; <https://orcid.org/0009-0007-7474-102X>; mikhailov@isp.nsc.ru

**Sergey N. Makarov** — Senior Researcher, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering at the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630058, Russia; Scopus ID: 57210786734; <https://orcid.org/0009-0007-6989-7978>; makarovsn@tdsie.nsc.ru

**Andrey G. Elesin** — Leading Engineer, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering at the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630058, Russia; Scopus ID: 57204198107; <https://orcid.org/0009-0005-4931-0792>; elesin.andrei@tdsie.nsc.ru

*The article was submitted to the editorial office 29.09.2023  
Approved after review 18.10.2023  
Accepted for publication 29.12.2023*