

## ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОКОНТРАСТНОГО МЕТОДА ДЕФОКУСИРОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕСНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

В. С. Рондарев и С. А. Смирнов

Рассматривается вопрос выявления примесной неоднородности полупроводников по изменению показателя преломления методом дефокусировки. Получено соотношение, связывающее распределение интенсивности в плоскости изображения с фазовой функцией объекта. Экспериментально исследованы образцы электронного арсенида галлия с полосчатой неоднородностью. Предложен метод количественного измерения вариации оптической толщины образцов методом дефокусировки.

При выявлении примесной неоднородности полупроводниковых кристаллов, не обладающих в отличие от исследованных в работе [1] абсорбционным контрастом, представляют интерес методы определения неоднородности по величине флуктуаций показателя преломления, обусловленных вариацией уровня легирования материала. Применение теневых методов [2, 3] и метода одновременного определения пространственного амплитудно-фазового распределения [4] существенно ограничено трудоемкостью эксперимента и сложностью получения количественных результатов. В этом смысле более приемлемы для выявления структуры примесной неоднородности интерференционные методы. В работе [5] для исследования однородности электронного арсенида галлия был использован двухлучевой интерферометр Тваймана—Грина с чувствительностью к изменению показателя преломления порядка  $10^{-3} \div 10^{-4}$ . Подобный метод может быть реализован и при использовании многолучевой интерференции в исследуемом кристалле [6]. Недостатком интерференционных методов в данном случае является малая величина смещения полос, что при достаточно большой ширине последних усложняет точную количественную оценку неоднородности.

В настоящей работе предлагается для выявления примесной неоднородности использовать фазоконтрастный метод дефокусировки.

### Преобразование фазового контраста в амплитудный в методе дефокусировки

Физическая сущность метода дефокусировки состоит в преобразовании фазового контраста объекта в амплитудный контраст в пространстве изображений формирующей оптической системы при смещении исследуемого объекта относительно плоскости предметов. Известно [7, 8], что изображающая оптическая система тождественна оптической системе двойной дифракции, в которой дефокусировка описывается неполным обратным преобразованием Фурье. Ниже рассматривается одномерный фазовый объект с фазовой функцией  $\Phi(x)$ . Функция пропускания  $f(x)$  подобного объекта имеет вид

$$f(x) = \exp [i\Phi(x)]. \quad (1)$$

Производя расчет аналогично работе [8], нетрудно показать, что при малых дефокусировках и одномерном распределении фазовой функции интенсивность в плоскости изображения может быть описана выражением

$$I(x) = 1 + 2b\Phi''(x) + b^2[\Phi''(x)]^2 + b^2[\Phi'(x)]^4, \quad (2)$$

где

$$b = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta z, \quad (3)$$

$\lambda$  — длина волны излучения,  $\Delta z$  — смещение объекта (со знаком) от плоскости предметов (дефокусировка).

Следует заметить, что выражение (2) отличается от ошибочно полученного в работе [8] и, вообще говоря, содержит члены более высоких порядков, нежели приведенное в [9]. Таким образом, фазовая функция объекта (1)

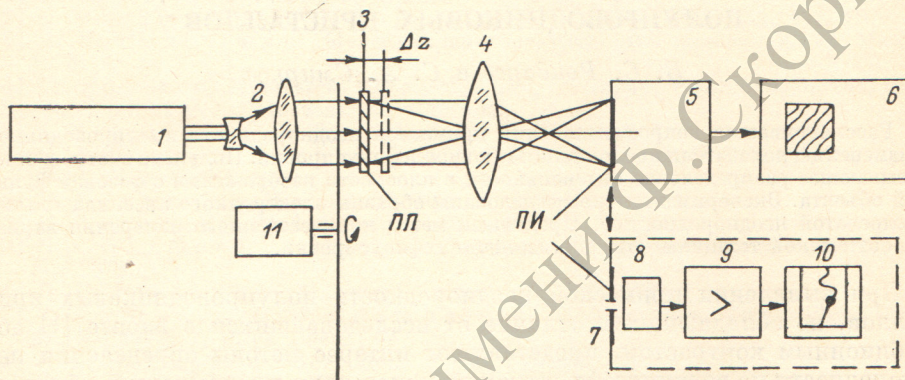


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.  
ПП — плоскость предметов, ПИ — плоскость изображения.

может быть определена из распределения интенсивности в плоскости изображения решением нелинейного дифференциального уравнения (2).

Получим, как и в [2], выражение для контраста изображения при синусоидальном распределении показателя преломления объекта

$$n = n_0 + \Delta n \sin \Omega x, \quad (4)$$

где  $\Omega$  — пространственная частота фазовой решетки (4).

Фазовая функция  $\Phi(x)$  подобного объекта определяется как

$$\Phi(x) = \Phi_0(1 + \alpha \sin \Omega x). \quad (5)$$

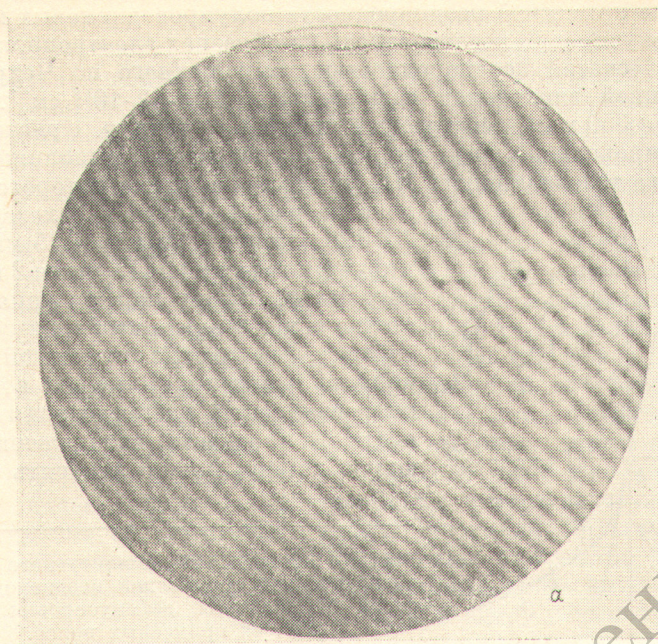
В (5) величины  $\Phi_0$  и  $\alpha$  соответственно равны  $2\pi n_0 d/\lambda$ ,  $\Delta n/n_0$ ;  $d$  — толщина объекта.

Подставляя (5) в (2), можно получить

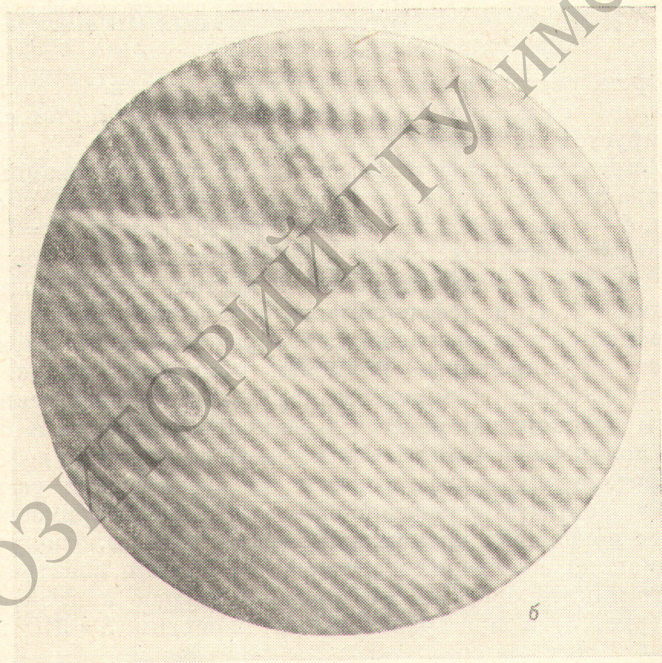
$$I(x) = 1 - 2b\Phi_0\alpha\Omega^2 \sin \Omega x + b^2\Phi_0^2\alpha^2\Omega^4 \sin^2 \Omega x + b^2\Phi_0^4\alpha^4\Omega^4 \cos^4 \Omega x. \quad (6)$$

При вполне естественном условии  $\alpha \ll 1$ , а также для  $b\Omega^2 \ll 1$  величины двух последних членов (6) существенно меньше, чем значение второго, поэтому распределение интенсивности незначительно отличается от синусоидального. В экстремальных же точках, определяющих контраст, к тому же последний член равен нулю. Отсюда следует формула для контраста изображения, обусловленного дефокусировкой

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2b\Phi_0\alpha\Omega^2}{1 + b^2\Phi_0^2\alpha^2\Omega^4}. \quad (7)$$



а



б

Рис. 2. Изображения кристалла электронного арсенида галлия.

Концентрация свободных электронов  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , толщина 325 мкм. Поле зрения микроскопа 7 мм, длина волны 1.15 мкм. Величина дефокусировки: а —  $\Delta z=0$ , б —  $\Delta z=15$  мм.

Выявление примесной неоднородности полупроводниковых кристаллов методом дефокусировки исследовалось на образцах электронного арсенида галлия с полосчатой неоднородностью, выращенного по Чохральскому, с концентрацией электронов в пределах  $6 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Толщина образцов  $250 \div 350 \text{ мкм}$ , легирующая примесь — теллур. Кристаллы механически полировались с двух сторон. Исследования выполнялись на макете лазерного телевизионного ИК микроскопа, схема которого представлена на рис. 1. Излучение лазера 1 типа ЛГ-126 (длина волны  $\lambda = 1.15 \text{ мкм}$ ) коллимируется телескопом Галилея 2 и освещает образец 3, путем перемещения которого можно осуществлять необходимую дефокусировку. Увеличение оптической системы — порядка единицы. С целью количественных измерений распределения интенсивности в плоскости изображения передающую камеру можно заменять сканирующей

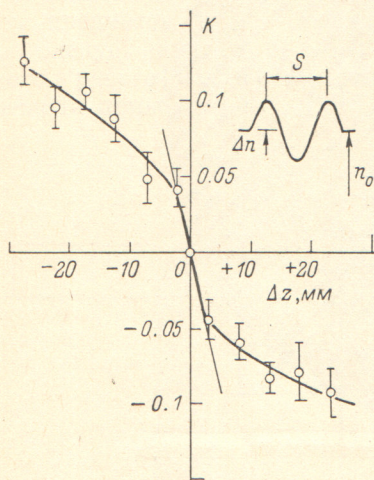


Рис. 3. Зависимость амплитудного контраста, обусловленного примесной неоднородностью образца от величины дефокусировки для одной из примесных полос.

На вставке показано распределение показателя преломления.  $S = 310 \text{ мкм}$ .

Рис. 3. Зависимость амплитудного контраста, обусловленного примесной неоднородностью образца от величины дефокусировки для одной из примесных полос.

фотометром, состоящим из диафрагмы 7, фотодиода 8, измерительного усилителя 9 и самопишущего потенциометра 10. В этом случае излучение модулируется дисковым obturatorом 11.

На рис. 2 представлены фотографии одного из исследованных кристаллов (концентрация свободных электронов  $N_e = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ): а — без дефокусировки, б — с величиной  $\Delta z = 15 \text{ мм}$ . В первом случае ( $\Delta z = 0$ ) выявилась система интерференционных полос равной толщины, а неоднородность легирования привела к их смещению в местах пересечения с примесными полосами [6]. При дефокусировке оптической системы указанная картина сохраняется в точности, но на изображении появляется амплитудный контраст, обусловленный наличием примесных полос.

С целью определения возможности локальных количественных измерений величины неоднородности  $\Delta n$  по величине контраста  $K$  была экспериментально получена зависимость последнего от значения дефокусировки  $\Delta z$  (рис. 3) фотометрированием в плоскости изображения распределения интенсивности, соответствующего одной выделенной примесной полосе. Распределение показателя преломления в последней было получено из данных абсорбционных измерений в дальней ИК области спектра с помощью сканирующего микроскопа. Снятый профиль хорошо аппроксимировался синусоидой (рис. 3) с пространственным периодом  $S = 310 \text{ мкм}$ .

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования подтвердили возможность применения метода дефокусировки для выявления примесной неоднородности полупроводниковых кристаллов в случае, когда она приводит к вариации показателя преломления. По сравнению с интерференционным достоинством данного метода является существенно лучшей наглядность (рис. 2). Абсорбционные измерения на кристаллах с указанными выше параметрами, проведенные при значительном увеличении длины волны (до  $10.6 \text{ мкм}$ ), показали хорошее качественное соответствие профилей распределения показателя пре-

ломления, рассчитанного [3] по результатам абсорбционных измерений концентрации свободных электронов и распределения интенсивности (2) при дефокусировке. Следует также особо отметить четкую взаимосвязь смещений интерференционных полос и изображения фазовой структуры объекта, обусловленных неоднородным легированием материала (рис. 2, б).

Существенный интерес представляет собой зависимость величины амплитудного контраста  $K$  от величины дефокусировки  $\Delta z$ . Анализ формулы (7) показывает, что для неоднородностей, дающих близкое к синусоидальному распределение интенсивности (2), угловой коэффициент наклона начального участка зависимости  $K$  ( $\Delta z$ ) равен  $\Delta(nd)\Omega^2$ . Измеряя по распределению интенсивности (2) пространственную частоту неоднородности  $\Omega$ , соответствующую периоду  $S$  (рис. 3), можно в конечном итоге определить вариацию показателя преломления  $\Delta n$ . Подобный метод для полосы (рис. 3) приводит к значению  $\Delta n = (1.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$ . Эта величина и значение  $\Delta n = (4.0 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$ , рассчитанное по методике [3], исходя из вариации концентрации свободных электронов, полученной из измерений коэффициента поглощения, удовлетворительно согласуются. Следует заметить, что на всех исследованных кристаллах было выявлено соответствующее формуле (7) обращение контраста при переходе через плоскость предметов ( $\Delta z = 0$ ). Количественные оценки показывают, что при значениях параметров и дефокусировки, соответствующих рис. 3, уравнение (2) линейно. Дальнейшее же увеличение величины дефокусировки  $\Delta z$  заметно усложняет нахождение фазовой функции  $\Phi(x)$  по распределению интенсивности  $I(x)$  из-за появления нелинейности (2), а затем и ввиду невыполнения условия  $b\Omega^2 \ll 1$ , с использованием которого получено это выражение. Кроме того, в области линейности уравнения (2) возможно применение Фурье-анализа для отыскания несинусоидальных фазовых функций.

В заключение следует отметить, что, во-первых, метод дефокусировки не требует введения дополнительных элементов в схему лазерного ИК микроскопа, в то же время позволяя расширить диапазон измерений в сторону меньших уровней легирования кристаллов вследствие возможности работы со слабопоглощающими объектами, во-вторых, выбранное приближение соответствует случаю идеальной оптической системы [в общем случае необходимо учитывать изменение частотно-контрастной характеристики при дефокусировке, приводящее, например, к нарушению линейной зависимости  $K(\Delta z)$  (рис. 3)].

#### Литература

- [1] Г. П. Прошко, В. И. Швейкин. ФТП, 1, 514, 1967.
- [2] M. E. Drougard. J. Appl. Phys., 37, 1858, 1966.
- [3] А. В. Дуденкова, В. А. Калачева, Ю. М. Попов, Н. Н. Шуйкин. ФТП, 5, 3, 1971.
- [4] А. М. Бардюков, М. Э. Берг, А. С. Гаркавенко, В. В. Календин, В. И. Кухтевич. Измерит. техника, № 9, 42, 1978.
- [5] Д. И. Арнольд, В. Л. Бакуменко, М. Н. Загарьянц, Л. Н. Курбатов. ФТП, 2, 876, 1968.
- [6] В. Т. Прокопенко, В. С. Рондарев. Матер. семинара: Неразрушающие методы и средства контроля изделий и конструкций из неметаллов. 71, Л., ЛДНТП, 1978.
- [7] Дж. Гудмен. Введение в фурье-оптику. «Мир», М., 1970.
- [8] Л. М. Сороко. Основы голографии и когерентной оптики. «Наука», М., 1971.
- [9] Дж. Каули. Физика дифракции. «Мир», М., 1979.

Поступило в Редакцию 31 января 1980 г.