

УДК 535.417,681.787

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ФОТОЭДС В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СОВРЕМЕННОЙ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

М. А. Брюшинин¹, И. А. Соколов¹, И. Н. Завестовская^{2,3},
Р. В. Ромашко⁴, Ю. Н. Кульчин^{3,4}

В работе исследуется возбуждение нестационарной фотоэдс в кристаллах карбида кремния и оксида галлия. Получены передаточные характеристики сигнала и определены фотоэлектрические параметры, необходимые для разработки адаптивных фотоприемников – удельная фотопроводимость, время максвелловской релаксации, диффузионная длина переноса носителей заряда. Определена чувствительность фотоприемника на основе оксида галлия.

Ключевые слова: нестационарная фотоэдс, адаптивный фотоприемник.

При реализации интерферометрических систем детектирования оптических фазо- и частотно-модулированных сигналов приходится уделять особое внимание стабилизации рабочей точки и совмещению волновых фронтов на поверхности детекторов [1–3]. Использование адаптивных фотоприемников на основе эффекта нестационарной фотоэдс является одним из способов решения данных проблем. Эффект нестационарной фотоэдс заключается в возникновении электрического тока в образце, освещаемом колеблющейся интерференционной картиной [4]. К настоящему времени эффект хорошо изучен в традиционных кубических фоторефрактивных кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{Si}(\text{Ti})\text{O}_{20}$ и GaAs . Расширение спектрального диапазона и круга задач, решаемых с помощью современных систем адаптивной оптики и оптоэлектроники, требует поиска новых фоточувствительных материалов. В данной работе эффект нестационарной фотоэдс исследуется в сре-

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021 Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: mb@mail.ioffe.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

³ НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

⁴ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5.

дах, не обладающих кубической симметрией, а именно, в кристалле 6H-SiC, облученном реакторными нейтронами, и в кристалле β -Ga₂O₃.

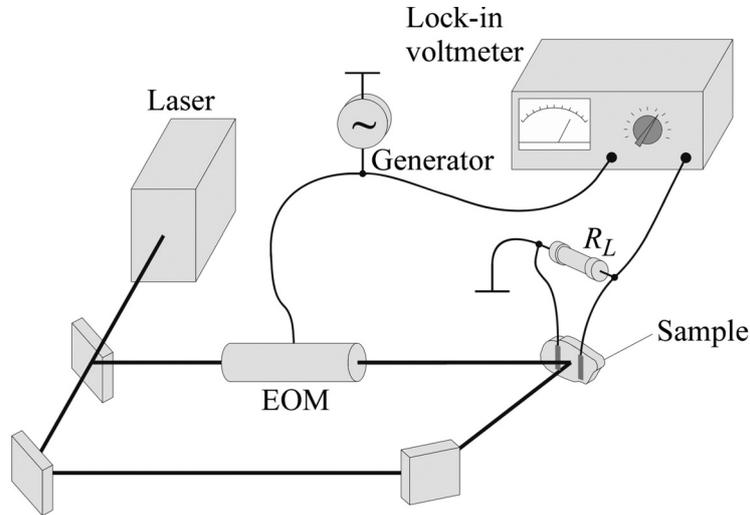


Рис. 1: Экспериментальная установка для исследования нестационарной фотоэдс.

Экспериментальная установка для исследования сигнала нестационарной фотоэдс представлена на рис. 1. Свет второй гармоники Nd:YAG лазера ($\lambda = 532$ nm, $P_{\text{out}} = 20$ mW) разделялся на два луча, которые затем формировали на поверхности образца интерференционную картину со средней интенсивностью $I_0 = 0.039 - 2.2$ W/cm², пространственной частотой $K = 0.13 - 17$ μm^{-1} и контрастом m ($m = 0.45$ и 0.98 в экспериментах с SiC и Ga₂O₃, соответственно). С помощью электрооптического модулятора сигнальный луч модулировался по фазе с амплитудой $\Delta = 0.61$ и частотой $\omega/2\pi = 0.002 - 100$ kHz. Плоскость поляризации света была перпендикулярна плоскости падения. Фототок, возникающий в образце, приводил к появлению напряжения на нагрузочном сопротивлении. Этот сигнал усиливался и затем измерялся селективным вольтметром и спектроанализатором. Кристалл SiC политипа 6H был выращен сублимационным сэндвич-методом. Затем кристалл был облучен реакторными нейтронами с дозой 10^{18} cm⁻². Передние и задние поверхности (6.0×1.0 mm), являющиеся срезом кристалла (0001), имели оптическое качество. На боковые поверхности (6.0×0.38 mm) были нанесены электроды с помощью серебряной пасты. Кристалл β -Ga₂O₃ был выращен методом зонной плавки. Исследуемый образец имел размеры $2.00 \times 2.15 \times 1.35$ mm вдоль кристаллографических направлений [100], [010] и вдоль направления, перпендикулярного плоскости (001). Передняя и задняя поверхности (2.00×2.15 mm) получены сколом

кристалла вдоль плоскости (001), никакая дополнительная обработка поверхностей не применялась. С использованием серебряной пасты электроды наносились на боковые грани. В работе исследуются две ориентации образца β -Ga₂O₃, в которых направление вектора записываемой зарядовой решетки (направление возбуждаемого тока) совпадает с осью кристалла [100] или [010], соответственно.

Нами были измерены частотные передаточные характеристики сигнала нестационарной фотоэдс (рис. 2(a)). Сигнал демонстрирует поведение, ранее наблюдавшееся в других кристаллах, а именно, присутствуют рост амплитуды при увеличении частоты фазовой модуляции в области $\omega < \omega_1$ и частотно-независимый участок при более высоких частотах $\omega > \omega_1$. Данные зависимости описываются выражением, полученным ранее для простейшей модели полупроводника с одним типом частично компенсированных донорных центров [2, 4]:

$$j^\omega = \frac{m^2 \Delta \sigma_0 E_D}{2(1 + K^2 L_D^2)} \cdot \frac{-i\omega/\omega_1}{1 + i\omega/\omega_1}, \quad (1)$$

$$\omega_1 = [\tau_M(1 + K^2 L_D^2)]^{-1}, \quad (2)$$

где $E_D = (k_B T/e)K$ – диффузионное поле, L_D – диффузионная длина электронов, $\tau_M = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma_0$ – время максвелловской релаксации [4]. Увеличение амплитуды сигнала с ростом частоты является важным проявлением адаптивности процесса формирования объемного заряда в фотопроводящих материалах. В области низких частот сигнал мал вследствие того, что решетка поля пространственного заряда и решетка свободных носителей отслеживают небольшие смещения интерференционной картины относительно среднего положения. Пространственный сдвиг между решетками поддерживается примерно равным $\pi/2$, что и приводит к малой величине сигнала. При более высоких частотах решетка с большим временем релаксации становится практически неподвижной, периодические пространственные сдвиги решеток увеличиваются, и ток достигает максимума на частотно-независимом участке. По положению частоты среза определяются величины τ_M и σ_0 . Для кристалла SiC они составили $\tau_M = 0.48 - 7.6$ ms и $\sigma_0 = (0.11 - 1.8) \times 10^{-9} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ($I_0 = 0.11 - 2.2$ W/cm²), а для кристалла β -Ga₂O₃ $\tau_M = 3.8 - 20$ ms и $\sigma_0 = (0.48 - 2.5) \times 10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ вдоль оси [100] и $\tau_M = 10 - 32$ ms и $\sigma_0 = (0.32 - 1.0) \times 10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ вдоль оси [010] ($I_0 = 0.039 - 0.4$ W/cm²).

Зависимость амплитуды сигнала от пространственной частоты интерференционной картины является еще одной характеристикой, обычно измеряемой в экспериментах с нестационарной фотоэдс. Результаты этих измерений приведены на рис. 2(b). По поло-

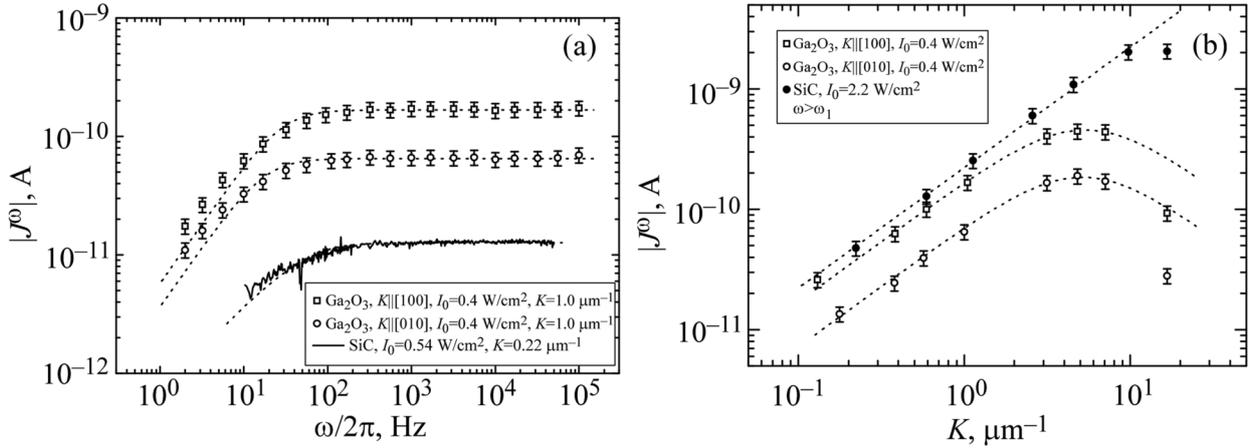


Рис. 2: Зависимости амплитуды нестационарной фотоэдс от частоты фазовой модуляции (a) и пространственной частоты (b), измеренные в кристаллах $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и SiC (b).

жению максимума на этой зависимости определяется диффузионная длина электронов: $L_D < 100$ nm в SiC и $L_D = 190 - 200$ nm в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

Оценим чувствительность адаптивного фотоприемника на основе $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ как амплитуду сигнала, нормированную на мощность сигнального луча и амплитуду фазовой модуляции: $S^\omega = J^\omega(P_s \Delta) = 1.5 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{W}^{-1} \text{ rad}^{-1}$. Шумы в нашей измерительной системе в основном определяются тепловыми шумами нагрузочного сопротивления $R_L = 300 \text{ k}\Omega$. Отсюда следует, что минимальная детектируемая амплитуда фазовой модуляции равна $\Delta_{\min} = (4k_B T R_L^{-1} \delta f)^{1/2} = (S^\omega P_s)^{-1}$, где δf – полоса детектирования. Для типичных значений $P_s = 1 \text{ mW}$ и $\delta f = 1 \text{ Hz}$ эта величина составляет $\Delta_{\min} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$. Эта оценка уступает значениям, полученным ранее для других широкозонных полупроводников, но, тем не менее, позволяет говорить о высокой чувствительности интерферометра, использующего данный фотоприемник.

В заключение, в работе исследован эффект нестационарной фотоэдс в кристаллах SiC и $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, являющихся перспективными материалами адаптивной оптики и оптоэлектроники. Из передаточных характеристик эффекта оценены важнейшие фотоэлектрические параметры – удельная фотопроводимость, время максвелловской релаксации и диффузионная длина переноса электронов. Полученная оценка чувствительности адаптивного фотоприемника позволяет говорить о возможности использования материалов при построении современных интерферометрических систем детектирования

оптических фазо- и частотно-модулированных сигналов, в том числе систем неразрушающего контроля реальных диффузно-рассеивающих свет объектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 19-12-00323).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. A. Kamshilin, R. V. Romashko, and Y. N. Kulchin, *J. Appl. Phys.* **105**, 031101 (2009).
- [2] M. A. Bryushinin, K. T. V. Grattan, V. V. Kulikov, and I. A. Sokolov, *J. Mod. Opt.* **53**, 857 (2006).
- [3] M. Bryushinin, V. Kulikov, I. Sokolov, et al., *EPL* **105**, 64003 (2014).
- [4] I. A. Sokolov, M. A. Bryushinin, S. V. Ordin, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 1063 (2006).

Поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.

После доработки 5 декабря 2019 г.

Принята к публикации 6 декабря 2019 г.