

# 07 Определение толщин и особенностей легирования многослойных 4H-SiC-структур методом частотного анализа инфракрасных спектров отражения

© А.В. Афанасьев, В.И. Зубков, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, М.В. Павлова, М.Ф. Панов<sup>✉</sup>, В.В. Трушлякова, Д.Д. Фирсов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> E-mail: 19\_panov\_59@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 сентября 2021 г.

В окончательной редакции 22 сентября 2021 г.

Принято к публикации 7 октября 2021 г.

Разработана методика частотного анализа инфракрасного спектра отражения для определения толщин и порядка расположения слоев в эпитаксиальной структуре карбида кремния. Выполнены расчеты для эпитаксиальной структуры 4H-SiC. Показана высокая чувствительность метода к оптическим границам, возникшим в результате последовательного увеличения уровня легирования в процессе роста слоя.

**Ключевые слова:** карбид кремния, эпитаксиальный слой, ИК-отражение, спектр.

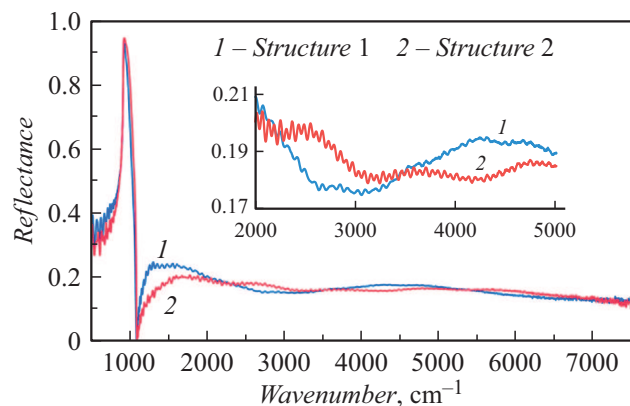
DOI: 10.21883/PJTF.2022.02.51919.19012

Уникальная совокупность электрофизических свойств карбида кремния политипной модификации 4H (4H-SiC) позволяет создавать на его основе приборы силовой электроники, которые существенно превосходят кремниевые аналоги по таким важнейшим параметрам, как величина сопротивления активной области, потери при переключении, плотность коммутируемой мощности, рабочая температура и частота. Поэтому развитию карбидокремниевой электронной компонентной базы обусловливает применение новых эффективных и оперативных методов анализа приборных эпитаксиальных структур (ЭС), в том числе контроля толщин слоев, существенно влияющих на характеристики приборов [1,2].

При падении электромагнитных волн на плоскопараллельный образец часть излучения отражается от границы раздела воздух–верхний слой, часть проходит в ЭС, где происходит серия отражений и преломлений от межслойных границ. Те волны, которые преломляются и двигаются в обратном направлении на границе верхний слой–воздух, интерферируют с волнами, отраженными от верхней границы структуры. Зависимость амплитуды интерференции от длины волны, регистрируемая фотоприемником, имеет периодический характер и является спектральной интерференцией. Разность хода интерферирующих волн определяется расстоянием от поверхности отражения. Поэтому в спектре отражения присутствуют компоненты, соответствующие толщине верхнего слоя  $d_n$ , суммарной толщине верхнего и следующего слоя  $d_n + d_{n-1}$  и т.д. Экспериментальные спектры отражения, измеренные на двух ЭС 4H-SiC, представлены на рис. 1, а соответствующие им технологические характеристики слоев и результаты измерений, полученные в настоящей работе, приведены в таблице. Каждой спектральной

компоненте в приближении постоянного показателя преломления ( $n \approx 2.64$  [3]) можно сопоставить толщину слоя, вычисляемую как  $d = (2\omega'n)^{-1}$  [4], где  $\omega'$  — период интерференционных спектральных колебаний. Визуальное определение величин периодов колебаний в спектре (особенно низкочастотных „биений“), которые являются суперпозицией синусоид, не представляется возможным, так как оно может давать одинаковые результаты для различных сочетаний исходных периодов. Следовательно, необходим частотный фурье-анализ спектра отражения.

Для корректного определения толщин эпитаксиальных слоев используется спектральная область отражения структуры, где материал — карбид кремния — не имеет линий поглощения и его показатель преломления обладает малой нормальной дисперсией. Поэтому для характеристики многослойных ЭС SiC: 1) из исполь-



**Рис. 1.** Экспериментальные спектры отражения. На вставке — участок в увеличенном виде.

Паспортные данные ЭС 1 и 2 и результаты фурье-анализа спектров отражения

Номер структуры	Параметр		Параметры эпитаксиальных слоев (нумерация от подложки)				
			1	2	3		
1	Технический паспорт	Тип проводимости	$n^+$	$p$	$p^+$		
		Концентрация примеси, $\text{cm}^{-3}$	$5 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{18} \rightarrow 1 \cdot 10^{20}$		
		Толщина, $\mu\text{m}$	10	16	5		
	Толщина по спектру (рис. 2, а), $\mu\text{m}$		9.25	16.4	2.05	2.05	1.03
2	Технический паспорт	Тип проводимости	$n^+$	$p$	$p^+$		
		Концентрация примеси, $\text{cm}^{-3}$	$5 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{18} \rightarrow 1 \cdot 10^{20}$		
		Толщина, $\mu\text{m}$	10	16	2.5		
	Толщина по спектру (рис. 2, б), $\mu\text{m}$		12.7	15.5	1.11	1.11	0.553
	Толщина по спектру (рис. 2, в), $\mu\text{m}$		12.8	15.6	1.11	1.11	0.556

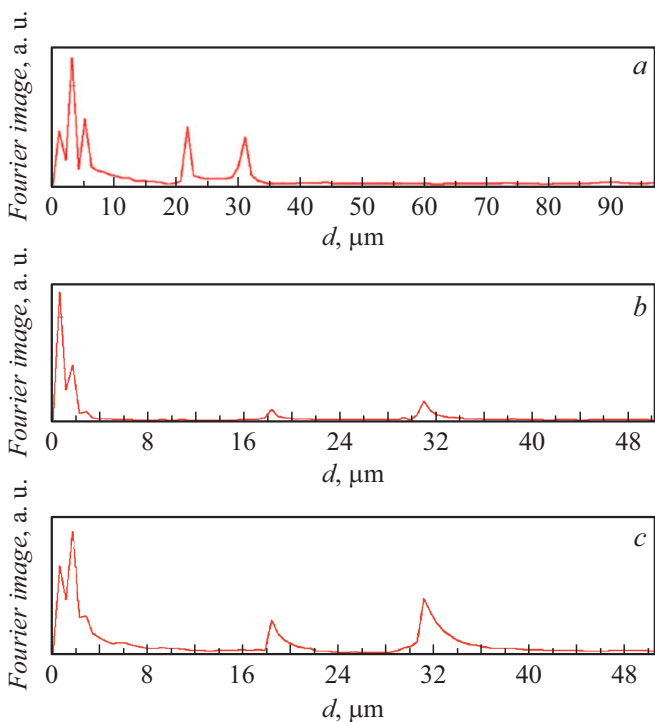


Рис. 2. Результаты фурье-анализа спектров отражения. а — структура 1; б — структура 2, диапазон  $2370-5783 \text{ cm}^{-1}$ ; в — структура 2, диапазон  $1843-5240 \text{ cm}^{-1}$ .

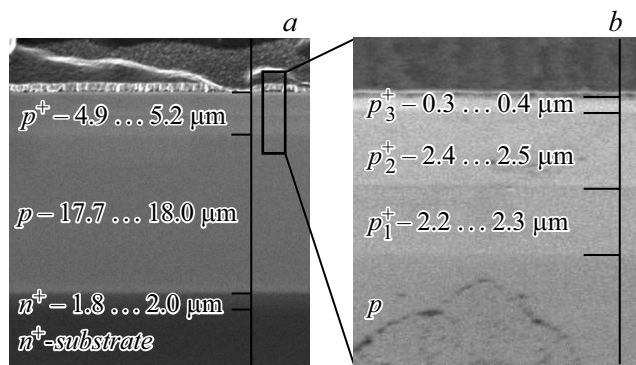
зубового для частотного анализа спектра исключается область однофоновно (вблизи  $1000 \text{ cm}^{-1}$ ) и плазмонного (менее  $1000 \text{ cm}^{-1}$ ) резонансов [5,6]; 2) при работе с экспериментальной спектральной кривой удаляется линия тренда, возникающая вследствие существующей малой дисперсии показателя преломления.

Результат обнаружения интересующей нас гармоники в спектре фурье-преобразования зависит от того, целое ли число ее периодов укладывается в анализируемую область. Если их число не целое, то в спектре

фурье-преобразования появляются пики на частотах, которые не соответствуют реальным накладывающимся гармоникам, но находятся рядом с реальными, при одновременном уменьшении амплитуды реальных пиков. Поэтому для минимизации появлений в спектре фурье-преобразования „побочных“ пиков, а также выявления и повышения амплитуды „истинных“ пиков производится корректировка анализируемого диапазона, направленная на использование при фурье-преобразовании целого числа периодов исследуемой части гармоники.

На рис. 2 приведены результаты фурье-анализа исследованных структур, отградуированные в толщинах слоев. Следует помнить, что первый пик указывает на толщину верхнего слоя, второй пик — на суммарную толщину верхнего слоя и слоя, лежащего под ним, и далее в той же последовательности. Минимальная определяемая толщина в соответствии с диапазонами спектра составляет около  $0.5 \mu\text{m}$ .

Использованный в работе алгоритм для анализа спектра отражения карбидокремниевых ЭС является весьма чувствительным. Он, например, позволил зафиксировать наличие оптических границ в структуре высоковольтного меза-эпитаксиального 4H-SiC  $p-i-n$ -диода, в котором на  $p$ -слое с относительно низкой концентрацией нескомпенсированных акцепторов ( $N_A - N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) создан высоколегированный  $p^+$ -эмиттер [7]. Выход на высокий, практически предельный по алюминию в SiC уровень легирования осуществляется в процессе эпитаксии поэтапно благодаря разработанной ранее технологии [8]. На рис. 3 приведено полученное методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) изображение типичной для таких приборных структур области эмиттера, где контраст изображения указывает на наличие подслоев с различной концентрацией акцепторной примеси. На рис. 2 можно видеть пики в фурье-образе спектра, соответствующие толщинам подслоев, а в таблице приведены



**Рис. 3.** РЭМ-изображение приборной карбидокремниевой ЭС в режиме контраста легирования. *a* — послойный состав ЭС, *b* — состав  $p^+$ -эмиттера.

численные значения толщин подслоев, определенные бесконтактным способом в настоящей работе.

Таким образом, в работе продемонстрирован бесконтактный способ определения толщин в приборных карбидокремниевых структурах политипа  $4H$ , который чувствителен к оптическим границам как между специально созданными функциональными областями ЭС, так и между слоями, возникающими в результате управления процессом осаждения. С применением частотного анализа спектров отражения в области ближнего и среднего ИК-диапазонов одновременно определены толщины пяти эпитаксиальных слоев, что позволяет применять разработанную методику для неразрушающего анализа многослойных ЭС  $4H$ -SiC.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 03.G25.31.0243).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S. Oishi, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, *Jpn. Soc. Appl. Phys.*, **45** (46), L1226 (2006). DOI: 10.1143/JJAP.45.L1226
- [2] Z.-Y. Li, J.-W. Sun, Y.-M. Zhang, Y.-M. Zhang, X.-Y. Tang, *Chin. Phys. Lett.*, **27** (6), 068103 (2010). DOI: 10.1088/0256-307X/27/6/068103
- [3] *Handbook of optical constants of solids*, ed. by E.D. Palik (Academic, San Diego, 1998).
- [4] В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович, *Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур* (Радио и связь, М., 1985).
- [5] K. Narita, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, S. Nakashima, *Jpn. J. Appl. Phys. A*, **43** (8), 5151 (2004). DOI: 10.1143/JJAP.43.5151
- [6] М.Ф. Панов, Ф.Е. Рыбка, В.П. Растегаев, в сб. *V Междисциплинарный научный форум „Новые материалы и перспективные технологии“* (М., 2019), т. 1, с. 377.
- [7] А.В. Афанасьев, В.А. Голубков, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, А.А. Рябко, К.А. Сергушичев, В.В. Трушлякова, С.А. Решанов, *Изв. ЛЭТИ*, № 6, 72 (2020).
- [8] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, С.А. Решанов, *Изв. вузов. Электроника*, **25** (6), 483 (2020). DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-6-483-496