

09

## Спектральная интерференция в карбидокремниевой $n^- - n^+$ -структуре

© М.Ф. Панов, В.П. Растегаев, С.А. Корлякова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: 19\_panov\_59@mail.ru

(Поступило в Редакцию 22 ноября 2013 г.)

Продemonстрировано наблюдение спектральной интерференции в карбидокремниевой структуре, в которой эпитаксиальный слой и подложка отличаются только мнимой частью показателя преломления. Результаты определения толщины слоя по периоду интерференции проконтролированы непосредственным измерением толщины слоя при помощи растровой электронной микроскопии. Спектральная зависимость вещественной части показателя преломления карбида кремния дополнена диапазоном длин волн 1.5–7  $\mu\text{m}$ .

Важнейшей операцией в технологическом цикле создания приборов на основе карбида кремния и построения контрольного готовых пластин с эпитаксиальным слоем карбида кремния на карбидокремниевой подложке является измерение толщины слоя, а также оптического показателя преломления, знание которого необходимо для определения толщины бесконтактными методами. В настоящей работе продемонстрирован контроль показателя преломления карбида кремния с использованием в качестве инструмента инфракрасного спектра структуры эпитаксиальный  $n^-$ -слой на  $n^+$ -подложке.

Среди современных неразрушающих методик контроля тонких слоев известны следующие методики. Оптическая микроскопия [1] основана на фокусировке света на обеих границах слоя и, следовательно, требует заметной разницы показателей преломления слоя и подложки. Эллипсометрия [2,3] характеризуется высокой точностью и чувствительностью, однако она наиболее эффективна для толщин менее 10  $\mu\text{m}$ . Более всех выделяется спектроскопическая методика. Преимущество спектроскопии заключается в том, что она основана на фиксации интерференции в слое, наблюдение которой возможно при совпадении показателей преломления  $n$ -слоя и подложки, но различии их коэффициентов экстинкции  $k$ . Толщины слоев, позволяющих наблюдать спектральную интерференцию, лежат в диапазоне от единиц до сотен микрон.

Важным в исследованиях такого рода является вопрос о том, как разница концентраций носителей в граничащих полупроводниках влияет на создание полноценного отражения от границы с различными уровнями легирования. Это требует обращения к теории электромагнитных волн в проводящей среде откуда следует [4], что фазовая скорость  $v$  в материале с ненулевой проводимостью

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} \left[ 1 + \frac{1}{8} \left( \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0\omega} \right)^2 \right]^{-1} \\ \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} \left[ 1 - \frac{1}{8} \left( \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0\omega} \right)^2 \right]$$

меньше, чем в идеальном диэлектрике. Скорость зависит от разности проводимостей (а не их отношения), влияние которых сказывается квадратичным образом. Разница фазовых скоростей означает различие комплексных показателей  $n - ik$  преломления слоя и подложки в  $n^- - n^+$ -структуре.

В настоящей работе исследование слоев эпитаксиального карбида кремния (политип 4Н) на карбидокремниевой подложке проводилось с использованием методики ИК-спектроскопии отражения на фурье-спектрометре Nicolet 6700 с микроскопом Continuum в диапазоне частот 650–4000  $\text{cm}^{-1}$  (длины волн 2.5–15  $\mu\text{m}$ ). Данный спектральный диапазон включает область однофононного поглощения карбида кремния (область „остаточных“ лучей), которой соответствует полоса 800–1000  $\text{cm}^{-1}$  [5,6]. При данных частотах имеет место резонансное отражение, а спектр хорошо описывается в рамках электронной теории дисперсии с использованием осцилляторной модели фононных колебаний с учетом вклада плазменных колебаний (для полупроводника с сильным легированием).

Исследованы слои слаболегированного электронного карбида кремния с концентрацией носителей порядка  $10^{14} \text{cm}^{-3}$  на высоколегированной  $n$ -типа подложке с концентрацией носителей порядка  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ . Высокая разница концентраций электронов, а соответственно и чувствительная разница в мнимых составляющих показателя преломления сделали возможным наблюдение спектральной интерференции. Экспериментальные спектры отражения подложки и слоя в ближнем и среднем ИК-диапазонах представлены на рис. 1. Разница в форме спектров отражения подложки и слоя соответствует теоретически предсказанному различию спектров для сильно и слаболегированного карбида кремния [5]. В спектре отражения слоя проявилась спектральная интерференция. В областях спектра вблизи плазмон-фононного резонанса имеет место аномальная дисперсия показателя преломления, проявляющаяся в уменьшении периода интерференции.

С использованием спектра отражения построена зависимость периода интерференции от волнового числа

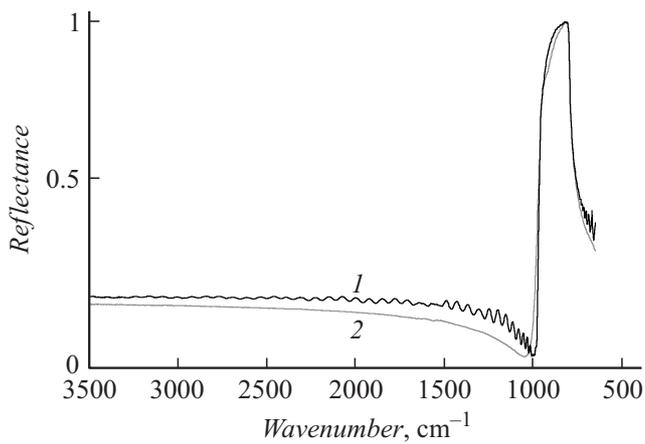


Рис. 1. Экспериментальные спектры отражения слоя (1) и подложки (2).

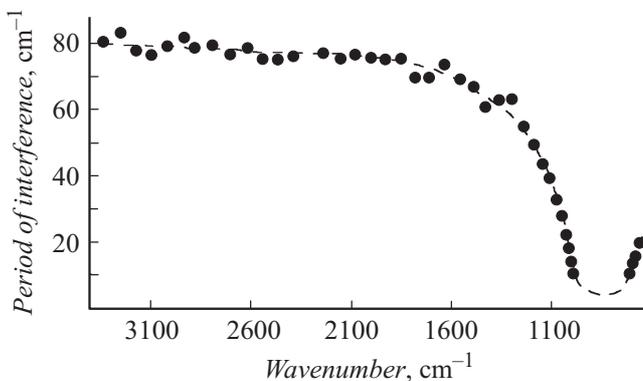


Рис. 2. Частотное распределение периода интерференции в слое.

(рис. 2). Спектральное изменение периода в исследуемом спектральном диапазоне весьма незначительно при волновых числах, больших  $1500 \text{ m}^{-1}$ . Это позволяет, зная показатель преломления, по среднему значению осцилляций довольно точно определять толщину слоя из выражения  $nd = 1/(2\Delta\nu_{\text{per}})$ , где  $\Delta\nu_{\text{per}}$  — значение периода спектральной интерференции в единицах частоты, а  $n$  — экспериментально измеренный показатель преломления, который в интервале  $\Delta\nu_{\text{per}}$  предполагается постоянным.

Экспериментальный контроль толщины слоя в настоящей работе проводился на растровом электронном микроскопе Quanta Inspect. Изображение скола структуры дало хороший контраст между слоем и подложкой за счет существенной разницы в концентрации свободных носителей заряда (рис. 3). Толщина исследуемого слоя составила  $23 \mu\text{m}$ . С использованием измеренного значения толщины слоя спектральная зависимость периода интерференции пересчитана в спектр показателя преломления  $n$ , приведенный на рис. 4. Там же приведены данные фирмы Sopra (<http://www.spectra.com/sopra.html>) для видимого и части ближнего ИК-диапазона. Вблизи области аномальной дисперсии экспериментальная ли-

ния спектра отображена штрихами в силу приближенного характера этих величин  $n$ , так как они получены без учета не нулевых значений мнимой составляющей показателя преломления карбида кремния в этой спектральной полосе.

Таким образом, ИК-спектроскопические исследования коэффициента отражения карбидокремниевой  $n^- - n^+$ -структуры показали возможность наблюдения в них спектральной интерференции, что открывает возможность бесконтактного контроля толщины слоя, а также позволили дополнить данные о показателе преломления SiC в ближней ИК-области — вплоть до области аномальной дисперсии в материале.

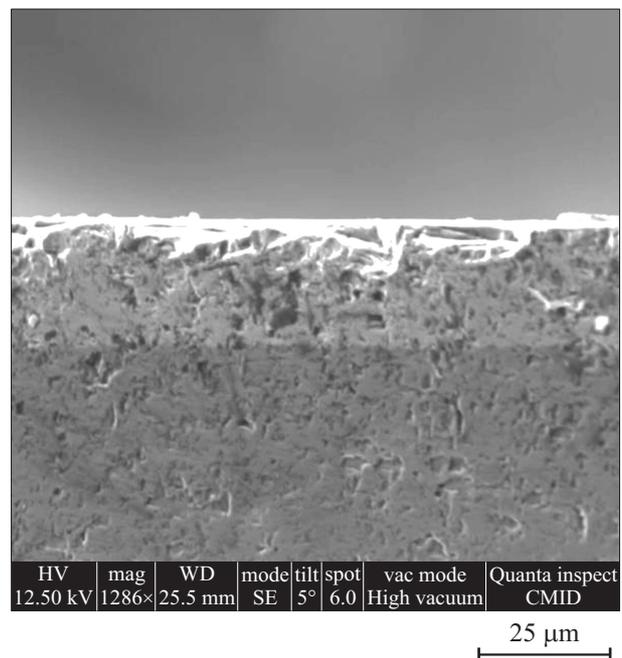


Рис. 3. Экспериментальный контроль толщины слоя  $n^-$ -SiC на подложке  $n^+$ -SiC с помощью растровой электронной микроскопии.

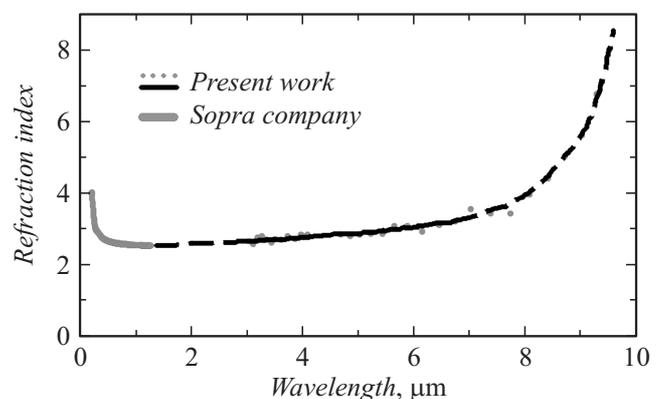


Рис. 4. Экспериментальная зависимость показателя преломления SiC от длины волны.

**Список литературы**

- [1] Микроскопия интегральных схем / Под ред. В.В. Лучинина. СПб.: Изд-во. СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2009. 172 с.
- [2] *Димитров Д.Ц., Лучинин В.В., Мошников В.А., Панов М.Ф.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 129–131.
- [3] *Лучинин В.В., Панов М.Ф.* // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 2. С. 129–134.
- [4] *Мартинсон Л.К., Малов Ю.И.* Дифференциальные уравнения математической физики: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. 368 с.
- [5] *Narita K., Hijikata Y., Yaguchi H., Yoshida S., Nakashima S.* // Japan. Appl. Phys. 2004. Vol. 43. N 8A. P. 5151–5156.
- [6] *Nakashima S., Harima H.* // Appl. Phys. 2004. Vol. 95. P. 3541–3546.