

Взаимодействие излучения оптического и радиочастотного диапазонов с электронами в оксиде индия–олова

Бассараб В.В.¹, Шалыгин В.А.¹, Шахмин А.А.², Соколов В.С.², Кропотов Г.И.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург

²ООО «ТИДЕКС», 194292, Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16

Среди множества применений оксида индия–олова (ОИО) в электронике, оптике и оптоэлектронике особое место занимает использование этого материала для подавления электромагнитных помех в радиочастотном диапазоне. Разработка бесконтактных методов определения параметров покрытий из ОИО, обладающих полупроводниковыми свойствами, является важной задачей. Один из таких методов был недавно предложен в [1]. В данной работе мы исследуем взаимодействие излучения оптического и радиочастотного диапазонов со свободными электронами в ОИО и предлагаем новый метод неразрушающего контроля тонкопленочных покрытий из этого материала. Экспериментально исследованы отражение и пропускание проводящих пленок ОИО различной толщины (69–445 нм) на диэлектрической подложке (боросиликатное стекло) в оптическом спектральном диапазоне, а также в радиочастотном диапазоне. Проведено теоретическое моделирование исследованных спектров с помощью метода матриц переноса. Для описания высокочастотной электропроводности свободных электронов в ОИО использовалась модель Друде.

В оптическом диапазоне экспериментальные исследования охватывали диапазон длин волн $\lambda = 0.2\text{--}4.5$ мкм. Выбиралось спектральное разрешение, чтобы подавить многолучевую интерференцию в подложке. Путем подгонки модельных спектров под экспериментальные определялись параметры пленок ОИО. Высокая точность в определении толщины пленки обеспечивается анализом спектров в области прозрачности (при $\lambda < \lambda_{\min}$, где $\lambda_{\min}$ – положение плазменного минимума). Достигнутая точность многократно превышает точность, обеспечиваемую методом сканирующей электронной микроскопии. Высокая точность в определении концентрации электронов и подвижности достигается в результате анализа спектров в области края плазменного отражения (при $\lambda > \lambda_{\min}$). Достижимая точность существенно выше, чем дают измерения эффекта Холла и электропроводности пленок на постоянном токе. Важным достоинством разработанного метода является его бесконтактность.

Исследования отражения и пропускания радиоволн проводились в диапазоне частот $f = 2.8\text{--}23$ ГГц. Максимальная эффективность подавления радиоволн (более 26 дБ) наблюдалась в пленке ОИО толщиной 445 нм с концентрацией электронов $9.9 \cdot 10^{20}$ см⁻³. Теоретическое моделирование спектров в радиочастотном диапазоне проводилось с использованием той же модели, что и в оптическом диапазоне. Модельные спектры хорошо согласуются с экспериментальными. Это еще один аргумент, подтверждающий высокую точность разработанного нами метода определения параметров пленок ОИО. Анализ спектров показывает, что высокая степень подавления радиочастотного излучения пленками ОИО обусловлена их высокой отражательной способностью, в то время как потери на поглощение пренебрежимо малы. В исследованном диапазоне частот степень подавления радиоволн указанной пленкой меняется с частотой от 26 до 34 дБ, что связано с многолучевой интерференцией в стеклянной подложке. При этом в видимом диапазоне, актуальном для многих оптоэлектронных приборов, пропускание пленки достаточно высокое ($\sim 80\%$).

В результате исследований установлена корреляция между эффективностью подавления радиочастотного излучения и отражательной способностью пленок в ИК-диапазоне. Найденная зависимость позволяет прогнозировать характеристики пленки ОИО в радиочастотном диапазоне, используя однократное измерение коэффициента отражения в ближнем ИК-диапазоне (при $\lambda = 2$ мкм).

[1] D. Ananthanarayanan, et al., *Solar Energy*, **209**, 424 (2020).