

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия фоторезистивных плёнок на кремнии

Д.И. Бринкевич¹, Е.В. Гринюк^{1,2}, В.С. Просолович¹, С.Д. Бринкевич³, В.В. Колос⁴,
О.А. Зубова⁴

¹Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ,
ул. Ленинградская, 14, г. Минск 220006, Беларусь

³ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии»,
Октябрьский пр-т, 122, г. Всеволожск 188640, Ленинградской обл., Россия

⁴ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 11.12.2024

Принята к печати 20.01.2025

Проведён сравнительный анализ применения метода отражательно-абсорбционной спектроскопии с использованием заводской приставки диффузного отражения DRIFT ИК-спектрофотометра ALPNA и метода нарушенного полного внутреннего отражения для исследования оптических характеристик плёнок фоторезистов ФП9120, AZ nLOF 2020, 2070, 5510 и КМР E3502 толщиной 0,99–6,0 мкм, сформированных на пластинах монокристаллического кремния методом центрифугирования. В отражательно-абсорбционных ИК спектрах полосы поглощения наблюдаются на фоне интерференционных полос, что позволяет определять показатель преломления фоторезиста при известной геометрической толщине плёнки. Показано, что метод отражательно-абсорбционной спектроскопии с использованием заводской приставки диффузного отражения DRIFT имеет как более высокую чувствительность по сравнению с методом нарушенного полного внутреннего отражения, так и пригоден для проведения неразрушающего межоперационного контроля в технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники. Наиболее интенсивными в отражательно-абсорбционных спектрах фоторезистивных плёнок AZ nLOF и КМР E3502 являются полосы валентных колебаний ароматического кольца ($\approx 1500\text{ см}^{-1}$), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (сдвоенный максимум ≈ 1595 и 1610 см^{-1}) и полоса с максимумом $\approx 1430\text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями бензольного кольца, связанного с CH_2 -мостиком. Установлено, что различия отражательно-абсорбционных спектров негативных фоторезистов разных производителей – MicroChemicals (AZ nLOF серии 2000) и Kemplur Microelectronics (КМР E3502) – связаны с различными технологиями получения фенолформальдегидной смолы и наличием в плёнках остаточного растворителя.

Ключевые слова: фоторезист, кремний, отражательно-абсорбционная спектроскопия, нарушенное полное внутреннее отражение

Адрес для переписки:

Просолович В.С.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Address for correspondence:

Prosolovich V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: prosolovich@bsu.by

Для цитирования:

Д.И. Бринкевич, Е.В. Гринюк, В.С. Просолович, С.Д. Бринкевич,
В.В. Колос, О.А. Зубова.
Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия
фоторезистивных плёнок на кремнии.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 69–76.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-15-1-69-76

For citation:

Brinkevich DI, Grinyuk EV, Prosolovich VS, Brinkevich SD,
Kolos VV, Zubova OA.
Reflective Absorption IR Fourier-Spectroscopy of Photoresistive
Films on Silicon.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):69–76. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

Reflective Absorption IR Fourier-Spectroscopy of Photoresistive Films on Silicon

D.I. Brinkevich¹, E.V. Grinyuk^{1,2}, V.S. Prosolovich¹, S.D. Brinkevich³, V.V. Kolos⁴,
O.A. Zubova⁴

¹Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

²Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University
Leningradskaya str., 14, Minsk 220006, Belarus

³LLC “My Medical Center – High Technologies”,
Oktyabrsky Ave., 122, Vsevolozhsk 188640, Leningrad region, Russia

⁴JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company,
Kazintsa str., 121A, Minsk 220108, Belarus

Received 11.12.2024

Accepted for publication 20.01.2025

Abstract

A comparative analysis of the reflectance-absorption spectroscopy method's application using the diffuse reflection factory prefix DRIFT of the ALPHA IR spectrophotometer and the method of attenuated total reflection for study of the optical characteristics of the FP9120, AZ nLOF 2020, 2070, 5510 and KMP E3502 photoresist films with a thickness of 0.99–6.0 μm formed on the plates of monocrystalline silicon by centrifugation has been carried out. In the reflective absorption IR spectra absorption bands are observed on the background of interference bands which makes it possible to determine the refractive index of a photoresist at a known geometric film thickness. It is shown that the reflective absorption spectroscopy method using the diffuse reflection factory prefix DRIFT has both a higher sensitivity compared with the attenuated total reflection method and is suitable for non-destructive interoperative control during semiconductor electronics devices's manufacturing. The most intense in the reflective absorption spectra of AZ nLOF and KMP E3502 photoresistive films are bands of valence vibrations of the aromatic ring ($\approx 1500\text{ cm}^{-1}$), pulsation vibrations of the aromatic ring carbon skeleton (double maximum ≈ 1595 and 1610 cm^{-1}) and a band with a maximum of $\approx 1430\text{ cm}^{-1}$ due to vibrations of the benzene ring, connected to the CH_2 bridge. It was established that differences in the reflective absorption spectra of negative photoresist of different manufacturers – Micro-Chemicals (AZ nLOF series 2000) and Kempur Microelectronics (KMP E3502) are associated with various technologies of phenol-formaldehyde resin production and the residual solvent presence in the films.

Keywords: photoresist, silicon, reflectance-absorption spectroscopy, attenuated total reflection

Адрес для переписки:

Просолович В.С.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Address for correspondence:

Prosolovich V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: prosolovich@bsu.by

Для цитирования:

Д.И. Бринкевич, Е.В. Гринюк, В.С. Просолович, С.Д. Бринкевич,
В.В. Колос, О.А. Зубова.
Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия
фоторезистивных плёнок на кремнии.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 69–76.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

For citation:

Brinkevich DI, Grinyuk EV, Prosolovich VS, Brinkevich SD,
Kolos VV, Zubova OA.
Reflective Absorption IR Fourier-Spectroscopy of Photoresistive
Films on Silicon.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):69–76. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

Введение

Повышение степени интеграции в современной полупроводниковой микроэлектронике предъявляет высокие требования к блоку литографических операций [1]. Так, если при формировании элементной базы по *n*-МОП технологии используется до 10 операций фотолитографии, то при формировании элементной базы по БИКМОП технологии применяется до 22 операций фотолитографии [2]. Фоторезисты (ФР) продолжают совершенствоваться вместе с развитием микроэлектроники. Разрабатываются новые рецептуры ФР для достижения более высокого разрешения, повышенной чувствительности и лучшего контроля над критическими размерами. Доминирующими резистами, используемыми в процессах субмикронной и нанолитографии, являются ФР на основе фенолформальдегидных смол [3, 4]. В качестве плёнкообразующего полимера ФР для обратной литографии обычно используют новолачные или резольные смолы, являющиеся разновидностью фенолформальдегидных смол. В связи с вышесказанным исследование указанных ФР актуально как с научной, так и с практической точек зрения.

Для исследования тонких плёнок широко применяется метод ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), позволяющий получать информацию о составе и структуре сложных органических соединений и их смесей в твёрдом агрегатном состоянии [5, 6]. Этот метод широко применяется для исследования фоторезистивных плёнок на пластинах монокристаллического кремния [7, 8]. Однако он обладает недостаточной чувствительностью при измерении тонких (1–3 мкм) плёнок в широком диапазоне спектра. Кроме того, при измерении НПВО твёрдых плёнок необходим прижим для обеспечения плотного контакта плёнки с измерительной призмой. Это приводит к нарушению однородности, образованию царапин на поверхности плёнок и в некоторых случаях может вызывать разрушение измеряемого образца. Т.е. данный метод не позволяет проводить неразрушающий контроль параметров плёнок в процессе межоперационного контроля при проведении литографических операций на различных стадиях изготовления приборов

полупроводниковой электроники. С другой стороны, недостаточное прижимное усилие снижает интенсивность полос поглощения в спектре НПВО и, соответственно, чувствительность и воспроизводимость измерений.

Целью настоящей работы являлось изучение возможностей отражательно-абсорбционной ИК Фурье-спектроскопии с использованием приставки для диффузного отражения при исследовании оптических характеристик плёнок фоторезистов на монокристаллическом кремнии.

Образцы и метод исследования

Плёнки позитивного ФП9120 и негативных AZ nLOF2020, 2070, 5510 и KMP E3502 фоторезистов толщиной 0,99–6,0 мкм наносились на поверхность Si методом центрифугирования [9]. Перед нанесением ФР пластины кремния подвергались стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После формирования плёнки ФР проводилась её сушка при температуре 90–110 °С. Измерение толщины плёнок ФР выполнялось на растровом электронном микроскопе HITACHI S-4800. ИК-Фурье спектры структур ФР/Si регистрировались в диапазоне 400–4000 см⁻¹ при комнатной температуре спектрофотометром ALPHA (Bruker Optik GmbH). Использовались заводские приставки для измерения диффузного отражения и нарушенного полного внутреннего отражения. При измерении НПВО разрешение составляло 2 см⁻¹, количество сканов – 24. Для исследования отражательно-абсорбционных ИК спектров использовалась приставка для диффузного отражения. В данном случае спектры поглощения слоями ФР формировались в результате прохождения зондирующего ИК излучения через слой в сторону кремниевой подложки, его зеркального отражения от подложки и обратного прохождения излучения через слой ФР, разрешение было не хуже 4 см⁻¹. Коррекция фона в обоих исследуемых методах проводилась перед каждым измерением.

Результаты и их обсуждение

Характерный отражательно-абсорбционный спектр плёнок позитивного новолачного фоторезиста ФП9120, полученный на приставке

для диффузного отражения, представлен на рисунке 1а. Для сравнения на рисунке 1б приведён спектр нарушенного полного внутреннего отражения того же образца. Отметим, что в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО энергетическое положение полос поглощения совпадало. Экспериментально измеренные частоты полос ИК-поглощения и их принадлежность к функциональным группам фоторезиста ФП9120, определённые по спектрам НПВО, приведены ранее в работе [7].

Интенсивность полос в отражательно-абсорбционных спектрах была существенно выше (приблизительно в 3 раза), чем спектрах НПВО (рисунок 1а и б). Указанные обстоятельства указывают на перспективность применения приставок для диффузного отражения при исследовании фоторезистивных

плёнок на пластинах монокристаллического кремния. Определённым недостатком применения приставки для диффузного отражения является то, что в отражательно-абсорбционном спектре полосы поглощения наблюдаются на фоне интерференционных полос. Так, для плёнок толщиной ≈ 5 мкм (рисунки 1а и 2) наиболее интенсивные полосы поглощения наблюдались в области $700\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ на фоне первой (экстремум при $\approx 880\text{ см}^{-1}$) и второй (экстремум при $\approx 1560\text{ см}^{-1}$) интерференционных полос. Это обстоятельство затрудняет анализ изменения интенсивностей полос поглощения при внешних воздействиях. Отметим, что в спектрах НПВО плёнок ФР при волновом числе $\nu < 1600\text{ см}^{-1}$ (рисунок 1б) имеет место монотонное возрастание фонового поглощения, обусловленное рассеянием/отражением на границе раздела ФР/Si [7].

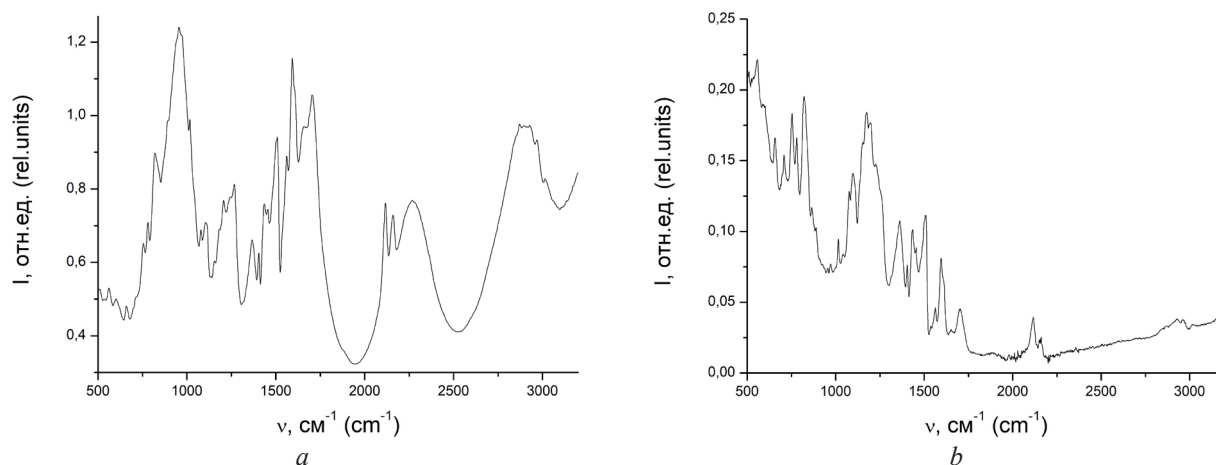


Рисунок 1 – Отражательно-абсорбционный спектр (а) и спектр нарушенного полного внутреннего отражения (б) плёнок толщиной 5,0 мкм позитивного фенолформальдегидного фоторезиста ФП9120

Figure 1 – Reflective absorption (а) and attenuated total reflection (б) IR spectra of positive phenol-formaldehyde photoresist FP9120 films with a thickness of 5.0 μm

С другой, стороны, наличие в отражательно-абсорбционных спектрах интерференционных полос открывает дополнительные возможности для исследования фоторезистивных плёнок. Известно [9], что энергетическое положение максимумов интерференционных полос определяется выражением:

$$m\lambda = 2nd, \quad (1)$$

где m – номер максимума; λ – длина волны максимума; n – показатель преломления

плёнки; d – геометрическая толщина плёнки. Это позволяет при известной геометрической толщине плёнки определить показатель преломления n фоторезистивной плёнки.

При уменьшении толщины плёнки интерференционные полосы уширяются и смещаются в область больших волновых чисел. При толщинах фоторезистивных плёнок $\approx 1\text{--}2$ мкм полосы поглощения отчётливо проявляются на фоне широкой первой интерференционной полосы (рисунок 3), что позволяет достаточно

уверенно анализировать изменение их интенсивности (в частности при внешних воздействиях). Кроме того, при этих толщинах плёнок интенсивность полос поглощения в отражательно-абсорбционных спектрах существенно выше, чем в спектрах НПВО. Это обусловлено особенностями регистрации отражённого сигнала при использовании приставки диффузного отражения. Таким образом, использование данного метода исследования спектральных характеристик тонких плёнок предпочтительнее ввиду его более высокой чувствительности по сравнению с методом НПВО. Он пригоден, кроме того, для проведения неразрушающего межоперационного контроля в технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники.

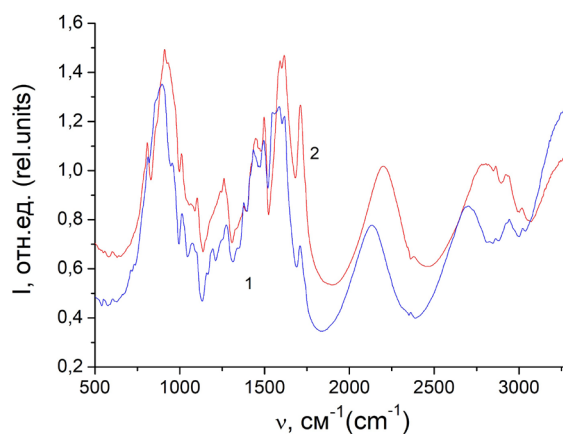


Рисунок 2 – Отражательно-абсорбционные спектры плёнок толщиной 5,8 мкм негативных фоторезистов AZ nLOF2070 (1) и KMP E3502 (2)

Figure 2 – Reflective absorption spectra of negative photoresists AZ nLOF2070 (1) and KMP E3502 (2) films with the thickness of 5.8 μm

На рисунке 2 приведены отражательно-абсорбционные Фурье-спектры плёнок одинаковой толщины (5,8 мкм) негативных ФР разных производителей: MicroChemicals GmbH, Германия (AZ nLOF2070 – кривая 1) и Kemplur Microelectronics, Китай (KMP E3502 – кривая 2). Они в основном совпадают, различаясь только в деталях, и качественно схожи с отражательно-абсорбционным спектром фенолформальдегидного позитивного фоторезиста ФП9120 (рисунок 1а). Основным отличием спектров негативных и позитивных ФР является то, что в спектрах негативных фоторезистов AZ nLOF и KMP E3502

отсутствуют полосы с максимумами при 2115 и 2150 см⁻¹, обусловленные кетеном – продуктом разложения светочувствительного компонента (диазохинона) позитивного фоторезиста ФП9120 [7].

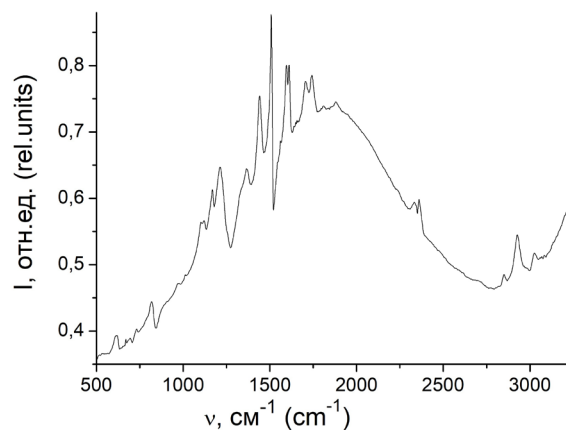


Рисунок 3 – Отражательно-абсорбционный спектр плёнок негативного фоторезиста AZ nLOF5510 толщиной 0,99 мкм

Figure 3 – Reflective absorption spectra of the negative photoresist AZ nLOF5510 films with the thickness of 0.99 μm

Отметим тот факт, что, несмотря на одинаковую толщину плёнок негативных фоторезистов AZ nLOF2070 и KMP E3502, максимумы их интерференционных полос смещены на ≈7 %. Это обусловлено, вероятно, различием в коэффициентах преломления данных фоторезистов. Коэффициент преломления фенолформальдегидных смол может варьироваться в диапазоне $n = 1,56–1,65$ вследствие различной степени замещения ароматических колец фенола в полимере [10]. Кроме того, значение n зависит от наличия других компонентов (в частности, остаточного растворителя) в плёнках фоторезистов.

Наиболее интенсивными в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО фоторезистивных плёнок AZ nLOF и KMP E3502 являются полосы валентных колебаний ароматического кольца (максимум при ≈1500 см⁻¹), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (сдвоенный максимум при ≈1595 и 1610 см⁻¹) и полоса с максимумом при ≈1430 см⁻¹, обусловленная колебаниями бензольного кольца, связанного с CH₂-мостиком [11]. Эти полосы характерны для фенолформальдегидной

смолы [11] и наблюдались ранее в различных позитивных [7,8] и негативных [12] фоторезистах.

Во всех отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО исследованных фоторезистивных плёнок наблюдалась интенсивная широкая структурированная полоса с несколькими максимумами в диапазоне $1050\text{--}1270\text{ см}^{-1}$. В данном спектральном диапазоне наблюдаются колебания С–О и С–С-связей растворителя и плоскостные деформационные колебания С–О связей фенольной группы фенолформальдегидной смолы [11]. Кроме того, в диапазоне волновых чисел $1700\text{--}1720\text{ см}^{-1}$ наблюдалась связанная с остаточным растворителем полоса, обусловленная валентными колебаниями $\text{C}=\text{O}_{\text{str}}$ в сложных ароматических эфирах. Её интенсивность снижалась при сушке фоторезистивной плёнки. В тонких плёнках AZ nLOF5510 она имела 2 максимума (рисунок 3). Это может быть обусловлено образованием адгезионной связи с кремнием. Отметим, что растворитель ФР серии AZ nLOF – ацетат монометилового эфира пропиленгликоля (PGMEA) – используется для улучшения адгезии к поверхности кремния.

Наблюдался также ряд полос средней и малой интенсивности в области волновых чисел $\nu = 400\text{--}900\text{ см}^{-1}$, энергетическое положение и принадлежность которых к функциональным группам были подробно рассмотрены в [7, 12]. Наиболее сильной из них была полоса деформационных колебаний С–Н связей с максимумом при 810 см^{-1} , обусловленная внеплоскостными колебаниями С–Н-связей ароматического кольца.

В области валентных колебаний С–Н связей в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО фоторезистивных плёнок наблюдались полосы с максимумами при ≈ 2870 и 2925 см^{-1} , обусловленные асимметричными и симметричными валентными колебаниями С– H_2 связей, и полоса с максимумом при 3010 см^{-1} , связанная с валентными колебаниями С–Н связи. Отметим, что интенсивность полос колебаний С– H_2 связей была существенно выше интенсивности полосы колебаний С–Н связей (рисунок 3). В отражательно-абсорбционных спектрах всех фоторезистивных плёнок также присутствовала широкая слабая полоса с максимумом в области $\approx 3300\text{ см}^{-1}$, обусловленная валентными колебаниями О–Н связи.

Отражательно-абсорбционные спектры, как и спектры НПВО, негативных ФР разных производителей – MicroChemicals GmbH, Германия и Kemplur Microelectronics, Китай – различались в деталях (рисунок 2). Это, вероятнее всего, связано с различными технологиями, используемыми этими производителями. Так, интенсивность полос с максимумами при 3010 и 2925 см^{-1} , связанных с валентными колебаниями СН- и CH_2 -групп, выше в плёнках КМР E3502, а в фоторезистах AZ nLOF2070 преобладает полоса с максимумом при $\approx 2940\text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями CH_3 - группы. В плёнках AZ nLOF2070 были выше интенсивности полос, связанных с остаточным растворителем – полосы с максимумами при 1710 см^{-1} (характерна для валентных колебаний С=О связей в сложных алифатических эфирах [6]), 1375 , 1240 и 1180 см^{-1} (колебания С–О связей в эфирной группе). Интенсивность этих полос снижалась при термообработках, и они частично исчезали из спектра.

Различия в отражательно-абсорбционных спектрах фоторезистов КМР E3502 и AZ nLOF2070 наблюдались также и в области пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца. Интенсивность полос с максимумами при ≈ 610 и 1590 см^{-1} была выше в фоторезистах корпорации Kemplur Microelectronics (КМР E3502). С другой стороны, в плёнках AZ nLOF2070 дополнительно наблюдалась достаточно интенсивная полоса с максимумом при $\approx 1550\text{ см}^{-1}$, что может указывать на наличие взаимодействий, изменяющих силовые поля вблизи части ароматических колец. В пользу этого вывода свидетельствует смещение в низкоэнергетическую область полосы, обусловленной колебаниями бензольного кольца, связанного с CH_2 -мостиком [11]. Её максимум в КМР E3502 наблюдался при $\approx 1450\text{ см}^{-1}$, а в AZ nLOF2070 смещался к $\approx 1435\text{ см}^{-1}$. Интенсивности и энергетическое положение остальных полос ИК поглощения в плёнках AZ nLOF2070 и КМР E3502 совпадали.

Заключение

Проведено сравнение ИК-Фурье отражательно-абсорбционных спектров и спектров нарушенного полного внутреннего отражения плёнок фенолформальдегидных фоторезистов

ФП9120, AZnLOF 2020, 2070, 5510 и КМР Е3502 толщиной 0,99–6,0 мкм, сформированных на пластинах монокристаллического кремния методом центрифугирования. Установлено, что интенсивность полос поглощения в отражательно-абсорбционных спектрах приблизительно в 3 раза выше, чем в спектрах нарушенного полного внутреннего отражения.

Показано, что отражательно-абсорбционная спектроскопия обладает преимуществами перед исследованиями спектров нарушенного полного внутреннего отражения при изучении тонких (менее 2–3 мкм) плёнок также и с точки зрения возможности проведения неразрушающего межоперационного контроля. Установлено, что наиболее интенсивными в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах нарушенного полного внутреннего отражения фоторезистивных плёнок AZ nLOF и КМР Е3502 являются полосы валентных колебаний ароматического кольца (максимум при $\approx 1500 \text{ см}^{-1}$), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (сдвоенный максимум ≈ 1595 и 1610 см^{-1}) и полоса с максимумом при $\approx 1430 \text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями бензольного кольца, связанного с CH_2 -мостиком.

Различия в отражательно-абсорбционных спектрах негативных фоторезистов разных производителей – MicroChemicals (AZ nLOF серии 2000) и Kemplur Microelectronics (КМР Е3502) – связаны с различными технологиями получения основы фоторезистов и наличием в плёнках остаточного растворителя. В отражательно-абсорбционных спектрах фоторезистивных плёнок наблюдаются интерференционные полосы, что позволяет определять показатель преломления фоторезиста n (при известной геометрической толщине плёнки) или толщину плёнки (при известном n).

Благодарности

Работа выполнена в рамках задания 2.16 государственной программы научных исследований “Материаловедение, новые материалы и технологии”, подпрограммы “Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника” (“Наноструктура”).

Список использованных источников

1. Sunipa R., Ghosh C.K., Dey S., Pal A.K. Solid State and Microelectronics Technology. – Singapore: Bentham Science Publishers Pte. Ltd., 2023. – 407 p.
DOI: 10.2174/9789815079876123010001
2. Гранько С.В. Применение фоторезистивных масок для маскирования ионного пучка в технологии КМОП интегральных схем / С.В. Гранько [и др.] // Вестник Нижегородского университета. Сер. Физика. – 2001. – № 2. – С. 41–47.
3. Моро У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч. 2. – М.: Мир, 1990. – 632 с.
4. Mack C.A. Field Guide to Optical Lithography. – SPIE Press, Bellingham, WA, 2006. – 122 p.
5. Харченко А.А. Радиационно-индуцированные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении γ -квантами ^{60}Co / А.А. Харченко [и др.] // Химия высоких энергий. – 2022. – Т. 56, № 5. – С. 378–387.
DOI: 10.31857/S0023119322050059
6. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных, Москва, Мир, Бином. 2006. – 438 с.
7. Бринкевич С.Д. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов B^+ / С.Д. Бринкевич [и др.] // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386.
DOI: 10.31857/S0023119320050046
8. Garcia I.T.S. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac–diazoquinone films / I.T.S.Garcia, F.C.Zawislak, D.Samios // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228, no. 1–4. – Pp. 63–76.
DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.027
9. Бринкевич Д.И. Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2019. – Т. 48, № 3. – С. 235–239.
DOI: 10.1134/S0544126919020029
10. Аскадский А.А., Кондрашенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Том 1. Атомно-молекулярный уровень. М.: Научный мир. 1999. – 544 с.
11. Poljansek I. Characterization of phenol-urea-formaldehyde resin by inline FTIR spectroscopy / I. Poljansek, U. Sebenik, M. Krajnc // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 99, no. 5. – Pp. 2016–2028.
DOI: 10.1002/app22161
12. Бринкевич Д.И. Инфракрасная Фурье-спектроскопия структур фоторезист/кремний, используемых для обратной литографии / Д.И. Бринкевич [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 6. – С. 863–869.

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of task 2.16 of the State Research Programme "Material Science, New Materials and Technologies", subprogramme "Nanostructured materials, nanotechnologies, nanotechnique" ("Nanostructure").

References

1. Sunipa R, Ghosh CK, Dey S, Pal AK. Solid State and Microelectronics Technology. Singapore: Bentham Science Publishers Pte. Ltd. 2023;407 p. DOI: 10.2174/9789815079876123010001
2. Granko SV, Volk SA, Leontiev AV, Kamyshan FF. Application of photoresistive masks for ion beam masking in CMOS technology of integrated circuits // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. Ser. Physics. 2001;(2):41-47.
3. Moreau WM. Semiconductor lithography. Principles, practices and materials. N.Y., London: Plenum Press. 1988;952 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-0885-0
4. Mack CA. Field Guide to Optical Lithography. – SPIE Press, Bellingham, WA. 2006;122 p.
5. Kharchenko AA, Fedotova YuA, Zur IA, Brinkevich DI, Brinkevich SD, Grinyuk EV, Prosolovich VS, Movchan SA, Remnev GE, Linnik SA, Lastovskii SB. Processes induced in DLC/Polyimide structures by irradiation with ^{60}Co γ -rays. High Energy Chemistry. 2022; 56(5):354-362. DOI: 10.1134/S0018143922050058
6. Pretsch E, Bühlmann P, Affolter C. Structure Determination of Organic Compounds, Berlin: Springer, 2000.
7. Brinkevich SD, Grinyuk EV, Brinkevich DI, Prosolovich VS. Modification of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B^+ Ions. High Energy Chemistry. 2020;54(5):342–351. DOI: 10.1134/S0018143920050045
8. Garcia ITS, Zawislak FC, Samios D. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac–diazoquinone films. Applied Surface Science. 2004;228(1-4):63–76. DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.027.
9. Brinkevich DI, Kharchenko AA, Prosolovich VS, Odzhaev VB, Brinkevich SD, Yankovski YuN. Reflection spectra modification of diazoquinone-novolac photoresist implanted with B and P ions. Russian Microelectronics. 2019;48(3):197-201. DOI: 10.1134/S1063739719020021
10. Askadsky AA, Kondrashenko VI. Computer materials science of polymers. Vol. 1. Atomic and molecular level. M.: Scientific world. 1999;544 p.
11. Poljansek I, Sebenik U, Krajnc M. Characterization of phenol-urea-formaldehyde resin by inline FT-IR spectroscopy. Journal of Applied Polymer Science. 2006;99(5):2016-2028. DOI: 10.1002/app22161
12. Brinkevich DI, Grinyuk EV, Brinkevich SD, Prosolovich VS, Kolos VV, Zubova OA, Lastovskii SB. Fourier-IR spectroscopy of photoresist/silicon structures for explosive lithography. Journal of Applied Spectroscopy. 2024;90(6):1223-1228. DOI: 10.1007/s10812-024-01657-4