

Отрезки базиса закреплены реперными знаками специальной конструкции с вмонтированными приспособлениями принудительного центрирования.

Реперные знаки имеют внешнее оформление в виде металлических оград и опознавательных столбов, глубина залегания базисного центра составляет три метра, и в его основании расположена бетонная подушка в виде квадрата со стороной 2,5 м.

Принцип действия эталона основан на сравнении измеренного с помощью исследуемого дальномерного прибора расстояния с действительным значением расстояния, воспроизводимым эталоном. Действительное значение расстояния определяется между закрепленными на местности реперными знаками, расстояние между которыми известно с высокой точностью.

В состав национального эталона единицы длины-метра в области измерений больших длин входят два эталонных электронных тахеометра Leica TS 60, которые применяются в качестве эталонов сравнения при проведении международных сличений, а также для исследований метрологических характеристик эталона в период между сличениями.

При помощи электронного тахеометра проводят измерения наклонного расстояния между каждым реперными знаками, входящими в состав эталонного линейного базиса.

При измерении больших длин существенным фактором, влияющим на точность измерений, являются метеорологические параметры, такие как температура воздуха, относительная влажность воздуха и атмосферное давление. Поэтому для контроля этих параметров обязательно используют метеостанции, которые позволяют в автоматическом режиме собирать информацию и передавать ее пользователю для дальнейшей обработки.

Исследование случайной составляющей погрешности эталона проводилось с помощью электронных тахеометров при измерении расстояния между девятью реперными знаками эталонного линейного базиса.

УДК 621.315.592

ПРИРОДА СТАБИЛЬНЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ ЦЕНТРОВ В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ P⁺ И V⁺ ПЛЕНКАХ ПОЗИТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120

Бринкевич Д.И.¹, Лапчук Н.М.¹, Оджаяев В.Б.¹, Олешкевич А.Н.¹, Просолович В.С.¹, Янковский Ю.Н.¹, Черный В.В.²

¹Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Ионная имплантация широко используется в современной электронике и позволяет с высокой точностью управлять концентрацией легирующей примеси в полупроводниковых материалах.

Систематическая погрешность эталона была определена расчетным методом.

По результатам проведенных исследований установлены метрологические характеристики эталона.

Таблица 2

Диапазон значений величины, воспроизводимый эталоном	Характеристики точности при воспроизведении единицы величины	Характеристики точности при передаче размера единицы величины
от 20 м до 1350 м	Неисключенная систематическая погрешность $\theta = (0,3 + 0,3 \cdot L)$ мм, где L - км	Случайная погрешность S = 0,20 мм Погрешность передачи размера единицы величины $S_{\Sigma} = 0,30$ мм

Эталон предназначен для:

- воспроизведения, сохранения и передачи единицы длины метра в диапазоне измерений больших длин;
- проведения государственных приемочных и контрольных испытаний высокоточных приборов для измерения больших длин: лазерных дальномеров, тахеометров и GNSS-приемников;
- метрологической аттестации, поверки и калибровки геодезических средств измерений;
- определения и контроля приборных поправок геодезических приборов.

Наличие эталона обеспечит требуемую точность в данном виде измерений, тем самым способствуя, с одной стороны, самостоятельности и независимости эталонной базы республики, с другой - адаптации ее в европейскую и мировую системы обеспечения единства измерений. Предполагаемые потребители - БелГИМ, Государственный комитет по имуществу, кадастровые агентства по государственной регистрации и земельному кадастру, Академия наук, Государственное предприятие «Белгипродор», РУП «Белгеодезия», предприятия «Белгипрозем» и другие предприятия, использующие прецизионные дальнометры, тахеометры, GNSS-приемники.

В качестве масок в процессах субмикронной и нанолитографии важную роль играют диазохинон-новолачные резисты, представляющие собой композит из светочувствительного О-нафтхи-

нондиазида и фенолформальдегидной смолы. Взаимодействие фоторезистов с ультрафиолетовым, рентгеновским и видимым излучением исследовано достаточно подробно [1], в то время как процессы, индуцированные ионным облучением, практически не изучены, несмотря на то, что они могут оказывать существенное влияние на качество создаваемых приборов. Преимуществом магниторезонансных методов (в частности, ЭПР) является высокая чувствительность, которая особенно важна при исследовании тонких пленок. Целью настоящей работы являлось исследование радиационно-индуцированных процессов в пленках диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 при имплантации ионов бора и фосфора, а также облучении γ -квантами.

Пленки позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной 1.0 и 2.5 мкм наносились на поверхность Si методом центрифугирования. Толщина h пленки фоторезиста определялась скоростью вращения и составляла: 1.0 мкм при скорости вращения $\nu = 8300$ об./мин.; 2.5 мкм – при $\nu = 1200$ об./мин. В качестве подложек использовались пластины (диаметром 100 мм) монокристаллического кремния марки КДБ-10 с ориентацией (111). Перед формированием пленки фоторезиста пластины кремния подвергали стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях.

Спектры ЭПР пленок фоторезиста регистрировались на спектрометре “RadioPan SE/X-2543” с резонатором H_{102} в X-диапазоне при комнатной температуре. Максимальная мощность СВЧ излучения в резонаторе – 200 мВт. Частота модуляции магнитного поля – 100 кГц, амплитуда – 0.1 мТл. Для контроля добротности измерительного резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки магнитной компоненты СВЧ-излучения использовался кристалл рубина, закрепленный на стенке резонатора. Имплантация ионами P^+ и B^+ с энергией 60 кэВ в интервале доз $D=6 \cdot 10^{14} - 1.2 \cdot 10^{16}$ см⁻² при плотности ионного тока $j=4$ мкА/см² проводилась на ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6». Облучение полимерных пленок γ -квантами дозой до 270 кГр. проводилось на установке МРХ- γ -25М с источником ⁶⁰Со. Мощность поглощенной дозы составляла 0.25 ± 0.007 Гр/с.

На спектрах ЭПР необлученной пленки фоторезиста линий поглощения не наблюдалось. Облучение γ -квантами ⁶⁰Со дозой до 270 кГр и ионная имплантация дозами до $5 \cdot 10^{15}$ см⁻² также не приводили к образованию стабильных парамагнитных центров. При $D=6 \cdot 10^{15}$ см⁻² в спектре ЭПР имплантированных P^+ пленок появляется узкая синглетная линия шириной ~ 4 Гс. В имплантированных бором образцах она не наблюдалась, вероятнее всего, из-за низкой интенсивности.

Форма линии характерна для образцов, содержащих парамагнитные центры с анизотропным g -фактором. Ее анизотропные компоненты $g_{\parallel} = 2.0064$ и $g_{\perp} \sim 2.0015$.

После увеличения дозы имплантации до $1.2 \cdot 10^{16}$ см⁻² линия ЭПР смещалась в высокополевую часть спектра и наблюдалась во всех исследованных образцах. Величина ее g -фактора снижалась до значений 2.00127-2.00254 (табл.1), что очень близко к g -фактору свободного электрона ($g_s = 2.0023$). Линия становится ассиметричной, что свидетельствует о сильном спин-орбитальном взаимодействии, которое приводит к уменьшению величины g -фактора.

Таблица 1 – Параметры линии ЭПР в пленках фоторезиста, имплантированных дозой $1.2 \cdot 10^{16}$ см⁻²

Ион	P^+		B^+	
	1.0	2.5	1.0	2.5
Толщина пленки, мкм				
g -фактор	2.0018	2.0020	2.0021	2.0014
ΔH , Гс	5.30	5.47	8.86	9.05
Амплитуда, отн. ед.	1029.7	782.3	296.6	192.9
Концентрация радикалов, отн.ед.	28924	23407	23283	15799

Концентрация парамагнитных центров была выше при имплантации ионов фосфора, чем в образцах имплантированных ионами B^+ (табл.1). При этом ширина линии ЭПР в имплантированных P^+ пленках была почти в 2 раза меньше. Сужение линии ЭПР свидетельствует о росте обменного взаимодействия, которое обусловлено перекрытием областей делокализации парамагнитных центров. Отметим, что концентрация парамагнитных центров была выше в более тонких пленках (1.0 мкм) как при имплантации бора, так и фосфора (табл.1). Это обусловлено тем, что поглощенная доза в расчете на единицу объема полимера будет меньше для толстых пленок (2.5 мкм), а, следовательно, и степень их радиационной конверсии ниже.

Изменение потерь в резонаторе (добротности резонатора) при внесении в него исследуемых образцов контролировалось по изменению амплитуды эталонного образца рубина, наклеенного на стенку резонатора. Добротность контура (амплитуда сигнала эталона) снижалась при увеличении толщины пленки как в исходных, так и в имплантированных образцах на 7–14 % (табл.2). После имплантации амплитуда сигнала эталона возрастала, причем более интенсивно в случае внедрения ионов фосфора (табл.2). Указанный факт является неожиданным, поскольку при имплантации растет электрическая (омическая) проводимость полимерных пленок, что должно приводить к снижению добротности контура и, соответственно, к уменьшению амплитуды сиг-

нала эталона. Увеличение добротности резонатора с имплантированными образцами по сравнению с исходными пленками может быть связано с присутствием в исходной пленке фоторезиста небольшого количества воды (до 1 % от веса фоторезиста), которая удаляется в процессе имплантации (вакуум не менее 10^{-5} мм. рт. ст.)

Таблица 2 – Амплитуда сигнала ЭПР (в отн. ед.) эталона при внесении в резонатор пленок фоторезиста

Толщина пленки, мкм	$D=0$	P^+ $D=1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$	B^+ $D=1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$
1.0	1032	1304	1286
2.5	918	1213	1130

Идентифицированные нами долгоживущие парамагнитные центры в образцах фоторезиста могут образовываться в результате двух принципиально разных процессов. Но при этом и в одном, и во втором случае важным фактором является возможность стабилизации образующегося радикала за счет сопряжения с «протяженными» хиноидными фрагментами. Как и большинство других веществ, имеющих сопряженные $>C=O$ и $-C=C-$ связи, хинонметиновые группы в облученном фоторезисте акцептируют электроны с образованием стабильного анион-радикала. Несколько менее очевидной выглядит возможность образования долгоживущих радикалов за счет окисления фенольной группы. Феноксильный радикал может выступать в качестве окислителя. В этом случае радикал-молекулярная реакция является термодинамически выгодной за счет значительно большей делокализации образующегося в ней радикала по сравнению с исходным.

Образующиеся радикалы имеют мощную систему сопряженных двойных связей и, соответственно, высокую делокализацию спиновой плотности. Поэтому удается зарегистрировать их и спустя несколько недель после облучения фоторезиста. Наблюдаемое нами снижение величины g -фактора и увеличение интенсивности сигнала в спектрах ЭПР по мере роста дозы имплантации ионами связано с увеличением количества сопряженных $>C=O$ и $-C=C-$ связей, которые входят в

состав стабильного радикала, повышая его делокализацию и термодинамическую стабильность. При высокой степени радиационной конверсии фенол-формальдегидной смолы количество сопряженных кратных связей может быть настолько велико, что в стабильных радикалах неспаренный электрон будет иметь свойства, близкие к свободному электрону. Вследствие этого в фоторезисте, имплантированном P^+ и B^+ при увеличении дозы имплантации до $D=1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, величина g -фактора парамагнитных центров снижалась до значений 2.00127–2.00254 (табл.1).

Более низкая концентрация парамагнитных центров в имплантированных бором образцах фоторезиста связана с тем, что при имплантации ионов B^+ вклад ядерного торможения мал – не превышает 10–15 % от электронного торможения. Это существенно ниже, чем при имплантации фосфора, для которой потери на ядерное (около 40%) и электронное (~60%) торможение сопоставимы.

Отметим, что описанные выше радиационно-индуцированные процессы вероятнее всего происходят за пределами области пробега ионов. Наличие длинных молекулярных цепочек в структуре фенол-формальдегидной смолы способствует передаче энергии из области пробега ионов на сравнительно большие расстояния (более 1 мкм) [2].

Таким образом, образование долгоживущих радикалов, регистрируемых методом ЭПР спустя недели после имплантации позитивного фенол-формальдегидного фоторезиста, обусловлено образованием мощной системы сопряженных кратных связей $>C=O$ и $-C=C-$ в макромолекуле полимера.

Литература

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч.2. / У. Моро. – М.: Мир, 1990. – 632 с.
2. Brinkevich, D.I. Ion implantation of positive photoresists / D.I. Brinkevich, S.D. Brinkevich, N.V. Vabishchevich, V.B. Odzhaev, V.S. Prosolovich // Russian Microelectronics. – 2014. – V. 43, N 3. – P. 194–200.

УДК 004.931

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Шмигирёв Е.Ф., Козлов В.Л.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Одна из задач цифровой обработки изображений является повышение качества изображений для улучшения его визуального восприятия человеком. Другая крупная область применения методов обработки изображений – это решение задач, связанных с машинным восприятием изображений. В этом случае интерес вызывают процедуры,

извлекающие из изображения некоторую информацию и представляющие ее в форме, подходящей для компьютерной обработки.

Часто эта информация весьма мало похожа на визуальные признаки, используемые людьми при интерпретации содержимого изображения. Примерами информации такого рода, часто приме-