

2. Прищепов, М. А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и параметрическом регулировании скорости. / М. А. Прищепов // Агропанорама. – 2022. – № 3 (151). – С. 29–38.
3. Прищепов, М. А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и частотном регулировании скорости / М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова, А. И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2022. – № 4 (152). – С. 19–23.
4. Дементьев, Ю. Н. Автоматизированный электропривод: учебное пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.
5. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконяна. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
6. Гридин, В. М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным / В. М. Гридин // Электричество, 2012. – № 5. – С. 40–44.
7. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для вузов / А. И. Вольдек. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

УДК 539.21

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

А.М. Донденко, студент 1 курса АЭФ

Научный руководитель: А.А. Шевченко, канд. техн. наук, доцент
*УО «Белорусский государственный аграрный технический
университет»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Современная микроэлектроника требует высокой точности при производстве электронных компонентов. Важной частью этого процесса является нанесение тонких пленок, которые используются в качестве изоляционных, проводящих или защитных слоев. Их толщина может варьироваться от нескольких нанометров до нескольких микрометров, и даже малейшие отклонения от требуемых параметров могут привести к ухудшению работы устройств. В связи с этим, определение толщины тонких пленок является одним из важнейших этапов технологии. Существует ряд практических способов определения толщины тонких пленок: эллипсометрия, интерферометрия, электронная и атомно-силовая микроскопия и другие [1-4]. Но одними из наиболее точных методов контроля толщины тонких пленок являются оптические методы. Они основаны на

явлении сложения и вычитания световых волн при отражении от границ пленки. Благодаря этому можно точно измерять толщину пленок без их повреждения, что делает эти методы незаменимыми в микроэлектронике. Целью данной работы является оценка и анализ оптических методов измерения толщины тонких пленок.

Оптические методы измерения толщины тонких пленок основаны на принципе интерференции света. Интерференция возникает, когда две или более световые волны накладываются друг на друга. Это может привести либо к увеличению (конструктивная интерференция), либо к ослаблению (деструктивная интерференция) результирующего света. Когда свет падает на поверхность тонкой пленки, происходят два основных отражения: от верхней границы пленки (граница воздух–пленка) и от нижней границы пленки (граница пленка–подложка). Отраженные волны могут складываться или вычитаться в зависимости от разности хода, которая определяется толщиной пленки и длиной волны света. Если разность хода соответствует целому числу длин волн, свет усиливается; если половине длины волны – ослабляется.

Метод оптической рефлектометрии основан на анализе спектра отраженного света. Измеряя интенсивность света в разных спектральных диапазонах, можно определить толщину пленки. Преимуществом данного метода является то, что он подходит для измерения пленок толщиной от 50 нм до нескольких микрон, прост в реализации и позволяет анализировать пленки в реальном времени. Однако он имеет и ограничения: менее точен для сильно поглощающих пленок и существуют трудности при анализе многослойных структур.

Метод эллипсометрии использует поляризованный свет, который изменяет свою фазу и амплитуду после отражения от пленки. Эти изменения анализируются и позволяют определить толщину пленки с высокой точностью. Преимуществом метода является высокая точность (до 1 нм), он подходит для многослойных структур, позволяет измерять не только толщину, но и оптические свойства пленки. Недостатком данного метода является то, что он требует сложного оборудования и математической обработки данных и он чувствителен к шероховатости поверхности.

Метод интерференционной микроскопии позволяет локально измерять толщину пленки с высокой точностью, используя оптиче-

ский микроскоп с интерференционными фильтрами. Преимуществом такого метода является то, что он позволяет анализировать неоднородности толщины пленки и имеет высокое пространственное разрешение. Однако данный метод ограничен по толщине пленок (до нескольких микрометров) и требует точной калибровки оборудования.

Метод спектральной интерферометрии сочетает интерференцию света и спектральный анализ. Используется свет с широким спектром длин волн, и по интерференционной картине рассчитывают толщину пленки. К преимуществам метода относятся высокая точность и возможность измерять пленки толщиной от нескольких нанометров до десятков микрометров. Ограничением данного метода является чувствительность к шероховатости и неоднородности пленки, а также он требует сложного анализа данных.

Следует отметить, что интерференционные методы измерения толщины тонких пленок широко применяются в различных областях микроэлектроники. При производстве полупроводниковых приборов часто используют контроль толщины диэлектрических слоев (SiO_2 , Si_3N_4) в МОП-транзисторах, проводят измерение толщины пленок фотолитографии и осуществляют контроль антирефлексных покрытий. В оптоэлектронике также очень важным является измерение толщины пленок в OLED-дисплеях, а также оптимизация покрытий в лазерах и светодиодах. Широко используются данные методы и в нанотехнологиях, в частности, для измерения толщины пленок в нанoeлектронных устройствах. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, и их использование зависит от конкретных целей исследования.

Интерференционные методы контроля толщины тонких пленок играют ключевую роль в микроэлектронике. Они позволяют с высокой точностью измерять параметры пленок, что критично для надежной работы полупроводниковых приборов и оптических компонентов. К преимуществам таких методов прежде всего следует отнести высокую точность (позволяют измерять толщину с точностью до 1 нм), бесконтактность (метод не повреждает образец), быстрота измерений (подходит для массового контроля качества) и гибкость (можно измерять пленки разной природы: прозрачные, поглощающие, многослойные). Благодаря развитию современных оптических технологий такие методы продолжают совершенствоваться.

ся, обеспечивая еще большую точность и удобство измерений. В будущем, с развитием квантовых технологий и нанофотоники, интерференционные методы могут стать еще более важными для контроля качества в микроэлектронике.

Литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микроэлектроника.: Высшая школа, 2004.
2. Курец В.Ф., Шерстнев Л.Г. Оптические методы контроля в микроэлектронике // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2010.
3. Прокопенко В.Т., Кулак М.И. Интерференционные методы измерения толщины тонких пленок // Приборы и методы измерений. – 2015.
4. Жуков А.А., Петров А.П. Современные методы диагностики тонкопленочных структур в микроэлектронике. – Минск: БГУИР, 2018.

УДК 621.365.683.9

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МОЛОЧНОГО БЛОКА НА БАЗЕ МНОГОЗОННОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ

М.А. Волонтей, студент 5 курса АЭФ

Научный руководитель: И.Г. Рутковский, канд. техн. наук
*УО «Белорусский государственный аграрный технический
университет»,*

г. Минск, Республика Беларусь

На фермах крупного рогатого скота (КРС) в Республике Беларусь ежегодно выращивается более 1 млн гол. телят, в рацион кормления которых включен обрат (обезжиренное молоко) [1]. Согласно статистике в год от 100 гол. КРС выход составляет 90 гол. телят. Отелы происходят в основном с середины сентября по середину мая. При этом на ферме одновременно необходимо выпаивать до 30 гол. телят на каждые 100 гол. КРС. Норма подогреваемого обраты определяется из рациона кормления. Для телят до 6 месяцев, на 1 тонну готовой кормосмеси необходимо добавлять до 400 кг обраты [2]. В сутки теленок получает 10...16 литров жидкой кормосмеси, соответственно для ее приготовления требуется 4...6,4 литра обраты в сутки на одного теленка.