

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 621.382:681.586

А. А. Дружинин, д-р техн. наук,
И. И. Марьямова, канд. техн. наук,
Е. Н. Лавитская, канд. физ.-мат. наук,
А. П. Кутраков, Ю. М. Панков, канд. физ.-мат. наук,
Национальный университет
"Львовская политехника"

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Описаны разработанные на основе выращенных нитевидных кристаллов кремния p-типа сенсоры деформации (полупроводниковые тензорезисторы). Показана возможность их работы при криогенных и высоких температурах в сильных магнитных полях, электронном облучении, а также при больших уровнях деформации. Приведены также разработанные сенсоры давления для криогенных и высоких температур.

Введение

Развитие ряда областей техники, таких как авиационная, ракетно-космическая и др., выдвинуло на первый план задачу создания сенсоров, работоспособных в экстремальных условиях. В настоящее время кремний является основным материалом для изготовления сенсоров, что обусловлено технологичностью, низкой стоимостью, возможностью работы в широком диапазоне температур. Проведенные исследования механических и пьезорезистивных свойств нитевидных монокристаллов кремния, обладающих высокой степенью структурного совершенства, показали, что эти микрокристаллы являются идеальной элементной базой для создания на их основе сенсоров механических величин (деформации, усилия, давления, ускорения и др.) [1]. В связи с этим представляло интерес исследование возможности работы таких сенсоров в экстремальных условиях: при низких температурах, сильных магнитных полях, высоких температурах, радиациях и др.

Нитевидные кристаллы кремния

Кремниевые микрокристаллы в форме нитевидных кристаллов (НК) выращивались из газовой фазы методом химических транспортных реакций

в закрытой системе с участием брома как транспортирующего агента. Выращенные НК кремния представляют собой шестигранные призмы, вытянутые вдоль направления [111], с шириной грани 1...40 мкм и длиной 1...10 мм [2].

Легирование кристаллов различными примесями осуществлялось в процессе их роста. Золото и платина использовались как примеси, способствующие росту кристаллов в форме НК. Поскольку кристаллографическое направление [111] соответствует направлению максимального пьезорезистивного эффекта в кремнии p-типа [3], для создания сенсоров механических величин целесообразно использовать НК кремния p-типа проводимости. Поэтому наибольшее внимание было уделено получению НК кремния p-типа, легированных бором в широком диапазоне концентраций.

НК кремния обладают высокой степенью структурного совершенства, что обусловило их уникальные механические свойства. Как показали проведенные исследования [1, 4, 5], выращенные НК кремния имеют высокую механическую прочность, приближающуюся к теоретическому пределу прочности для данного материала. Это выгодно отличает НК от монокристаллов, полученных другими методами. Механическая прочность НК зависит от их диаметра: чем меньше диаметр, тем выше механическая прочность микрокристаллов. НК кремния диаметром 20...40 мкм выдерживают механические напряжения в диапазоне 1,5...2,4 ГПа, а кристаллы диаметром $d \leq 10$ мкм выдерживают 4 ГПа и выше (рис. 1), что соответствует деформации до 1 % и выше.

Теоретические и экспериментальные исследования пьезорезистивных свойств НК кремния p-типа, легированных бором, проводились в диапазоне концентраций примесей от $1 \cdot 10^{17}$ до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в шир-

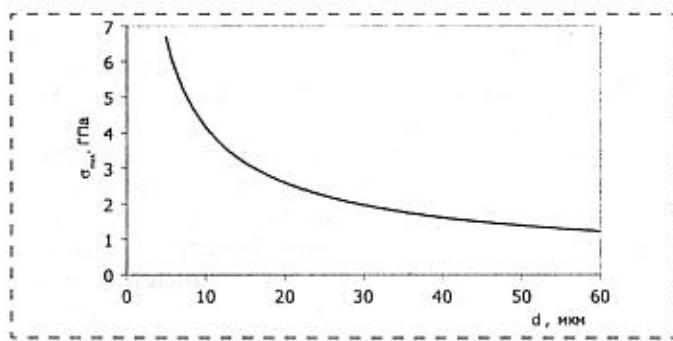


Рис. 1. Зависимость механической прочности НК кремния от их диаметра

рекомендуются температурный интервале 4,2...650 К [1, 4, 6]. Проведенные исследования показали, что выращенные НК кремния *p*-типа имеют большой продольный коэффициент пьезосопротивления, т. е. характеризуются высокой тензочувствительностью ($K \geq 100$), что делает их пригодными для создания на их основе различных пьезорезистивных сенсоров механических величин, работоспособных в различных температурных диапазонах.

Таким образом, можно отметить следующие преимущества НК кремния *p*-типа, способствующие их использованию в сенсорах механических величин:

- уникальная механическая прочность микрокристаллов;
- размеры НК соответствуют необходимым размерам чувствительных элементов сенсоров, что позволяет избежать трудоемких технологических операций;
- направление роста НК соответствует направлению максимального пьезорезистивного эффекта в кремнии *p*-типа, что позволяет реализовать в сенсорах максимальную тензочувствительность для данного материала;
- возможность легирования НК в процессе роста обеспечивает получение кристаллов Si с заданными электрическими параметрами.

Сенсоры деформации

Технология изготовления сенсоров деформации или полупроводниковых тензорезисторов на основе НК кремния состоит из нескольких технологических операций:

- получение НК кремния с заданными параметрами;
- отбор выращенных кристаллов для чувствительных элементов тензорезисторов;
- создание контактов к НК кремния и присоединение токовыводов;
- разбраковка изготовленных тензорезисторов.

В центре "Кристалл" разработана технология выращивания структурно совершенных НК кремния, легированных бором до заданной концентрации, обеспечивающая получение достаточно большого числа кристаллов, пригодных для использования в качестве чувствительных элементов тензорезисторов. Отбираются кристаллы с зеркальными гранями толщиной 20...40 мкм и длиной 3...5 мм. Омические контакты создаются методом импульсной сварки платиновой микропроволоки с микрокристаллом при одновременном подогреве кристалла во избежание возникновения термических напряжений в местах контакта. Температура эвтектики Si—Pt равна 830 °C, что обеспечивает возможность использования этих тензорезисторов при более высоких температурах, чем обычные кремниевые тензорезисторы с золотыми контактами (температура эвтектики Si—Au составляет прибли-

зительно 370 °C). Длина базы тензорезистора задается при изготовлении контактов и может составлять 1...5 мм в зависимости от условий применения.

Завершающей операцией является разбраковка изготовленных тензорезисторов по сопротивлению и температурному коэффициенту сопротивления (ТКС), поскольку этот параметр наиболее чувствителен к концентрации примесей в кристалле и может быть определен, когда тензорезистор находится в "свободном" состоянии (не закреплен на упругом элементе).

Разработанные тензорезисторы на основе НК кремния обладают прекрасными механическими свойствами. Они выдерживают деформации растяжения—скатия $\varepsilon = \pm 5 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (0,5 %), а тензорезисторы на основе НК толщиной 10 мкм могут работать в области упругих деформаций до 1 % [5]. Усталостные испытания показали, что эти тензорезисторы выдерживают свыше 10^7 циклов знакопеременной деформации с амплитудой $\varepsilon = \pm 1 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. без поломок и образования трещин; работоспособны при воздействии больших ускорений; хорошо переносят вибрации, перегрузки, ударные ускорения.

Проведенные исследования позволили определить оптимальные уровни легирования НК кремния бором для изготовления тензорезисторов, пригодных для работы в различных температурных диапазонах [1, 4, 6]. Тензорезисторы на основе НК кремния *p*-типа с концентрацией бора $(1\text{--}5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ обладают наиболее оптимальными характеристиками в диапазоне температур +20...+450 °C. При 20 °C они имеют большой коэффициент тензочувствительности $K = 100\text{--}140$ и небольшой ТКС, равный $+ (0,08\text{--}0,12) \% / ^\circ\text{C}$. Температурная зависимость коэффициента тензочувствительности таких сенсоров деформации в диапазоне температур +20...+500 °C показана на рис. 2. Возможность работы этих тензорезисторов при высоких температурах обеспечивается как свойствами самого кремния, в котором микропластичность наблюдается только при температуре выше +500 °C, так и технологией изготовления тензорезисторов с платиновыми контактами.

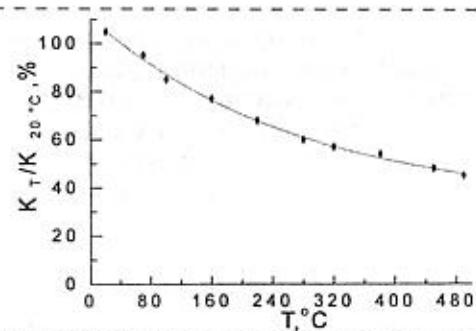


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента тензочувствительности тензорезисторов на основе НК кремния с $\rho = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

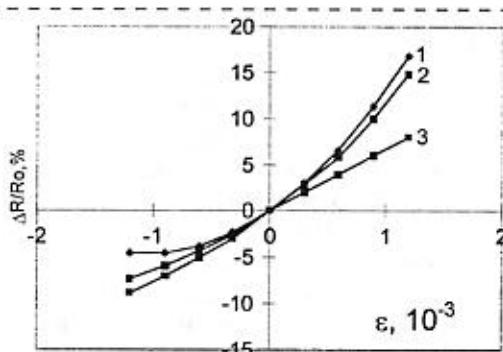


Рис. 3. Зависимости относительного изменения сопротивления от деформации для тензорезисторов на основе НК кремния с $\rho = 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при разных температурах:
1 — 4,2 К; 2 — 77 К; 3 — 300 К

Наиболее пригодными для создания тензорезисторов и сенсоров механических величин, работоспособных при криогенных температурах вплоть до температуры жидкого гелия, являются сильно легированные НК кремния p -типа с удельным сопротивлением $\rho \approx 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [6]. На рис. 3 приведены зависимости относительного изменения сопротивления этих тензорезисторов от деформации при разных температурах. При температуре 77 К их коэффициент тензочувствительности составляет около 100, а при 4,2 К равен приблизительно 140. Эти тензорезисторы имеют небольшие номиналы сопротивлений при криогенных температурах, а также линейную зависимость сопротивления от температуры в диапазоне 77...300 К. Кроме того, они работоспособны в сильных магнитных полях до 5 Тл. Изменение их коэффициента тензочувствительности в этом случае не превышает 3 % [4].

Тензорезисторы на основе специально легированных НК кремния p -типа с концентрацией примесей вблизи перехода металл—полупроводник имеют при 4,2 К очень высокую тензочувствительность: их коэффициент тензочувствительности достигает значения $K = (1\pm 2)\cdot 10^4$ [6]. Такие тензорезисторы можно использовать как для измерения очень малых деформаций при температуре жидкого гелия, так и для создания на их основе чувствительных сенсоров механических величин, предназначенных для работы при криогенных температурах.

Основные параметры разработанных тензорезисторов приведены ниже:

Диапазон измеряемых деформаций, отн. ед.	$\pm(1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3})$
Предельная деформация, отн. ед.	$\pm(0,8 \dots 1) \cdot 10^{-2}$
Номинальное сопротивление при 20 °C, Ом	50...400
Коэффициент тензочувствительности при 20 °C	+80...+150
TКС в диапазоне 20...120 °C, %·°C⁻¹	$\approx +0,1$

Температурный коэффициент тензочувствительности в диапазоне 20...120 °C, %·°C⁻¹ $\approx -0,2$
Рабочие диапазоны температур, °C $-60 \dots +450$; $-269 \dots +20$
Размеры, мм $(0,02 \dots 0,04) \times (0,02 \dots 0,04) \times (1 \dots 5)$

Сенсоры больших деформаций для прочностных испытаний вплоть до стадии разрушения изготавливались на основе НК кремния толщиной не более 10 мкм. В этом случае контакты создавались методом напыления платины, а сами чувствительные элементы устанавливались на специальных подложках [5]. Диапазон рабочих деформаций таких сенсоров $\varepsilon = (0,01 \dots 1) \%$, коэффициент тензочувствительности $K = 90 \dots 110$ при 20 °C, диапазон рабочих температур $-100 \dots +150$ °C. На рис. 4 приведены градуировочные характеристики этих сенсоров при различных температурах. Эти сенсоры успешно использовались при прочностных испытаниях различных изделий, в том числе для измерения ударных деформаций с фронтом нарастания в несколько миллисекунд.

Для оценки радиационной стойкости разработанных полупроводниковых тензорезисторов проводилось исследование влияния электронного облучения на их параметры [4]. Исследовались тензорезисторы на основе НК кремния, легированных бором, с удельным сопротивлением $\rho = 0,01 \dots 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Они облучались электронами высоких энергий 4,2 и 14 МэВ при 20 °C; доза облучения составляла $5 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{18}$ электрон/см². Измерялись сопротивление, ТКС и коэффициент тензочувствительности тензорезисторов до и после облучения.

Для стабилизации параметров облученных Si-тензорезисторов они подвергались отжигу при температуре 120 °C в течение двух часов. После отжига сопротивление тензорезисторов и их характеристики становятся воспроизводимыми в диапазоне температур $-100 \dots +100$ °C. Как показали изме-

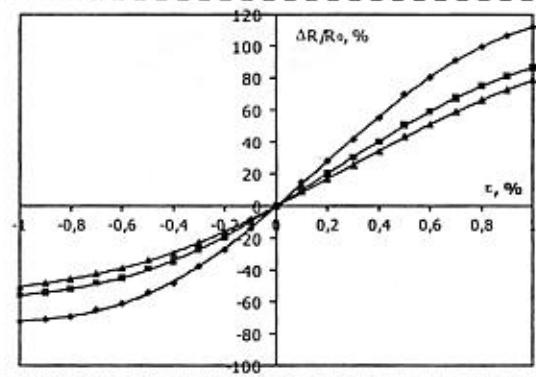


Рис. 4. Градуировочные характеристики тензорезисторов на основе НК кремния p -типа при больших уровнях деформации для разных температур:
1 — 100 °C, 2 — +20 °C, 3 — +150 °C

рения, ТКС тензорезисторов после облучения значительно уменьшается в диапазоне $+20\ldots+100^\circ\text{C}$. При дозе $1 \cdot 10^{18}$ электрон/ см^2 ТКС уменьшается почти на 40 % по сравнению с необлученными тензорезисторами при указанных значениях энергий электронов.

Облучение тензорезисторов электронами с интегральной дозой $\Phi \leq 1 \cdot 10^{17}$ электрон/ см^2 практически не изменяет их основных параметров. С увеличением интегральной дозы до $8 \cdot 10^{17}\ldots 3 \cdot 10^{18}$ электрон/ см^2 сопротивление тензорезисторов при нормальной температуре увеличивается, в то время как их ТКС в диапазоне температур $+20\ldots+100^\circ\text{C}$ уменьшается. Таким образом, разработанные кремниевые тензорезисторы сохраняют свои характеристики после облучения электронами высоких энергий с дозой, не превышающей $1 \cdot 10^{17}$ электрон/ см^2 .

Следует отметить, что разработанные полупроводниковые тензорезисторы, или сенсоры деформаций, отличаются от известных дискретных кремниевых тензорезисторов: своими уникальными механическими свойствами, позволяющими использовать их для измерения деформаций в различных динамических режимах (вплоть до стадии разрушения исследуемого объекта); широким диапазоном рабочих температур от криогенных до $+400^\circ\text{C}$; сравнительной простотой их изготовления.

Сенсоры давления для криогенных температур

При создании сенсоров для измерения давления криогенных сред использовалась разработанная нами тензомодульная конструкция с универсальным упругочувствительным элементом с закрепленными на нем тензорезисторами [6]. Конструкция такого сенсора давления показана на рис. 5. Основу конструкции составляет тензомодуль 4, ко-

торый представляет собой кольцевой элемент с консольной балочкой 5, с обеих сторон которой закреплены два тензорезистора. Прогиб мембранны 2 под действием давления передается через шток на консольную балочку тензомодуля, вызывая ее прогиб. В сенсоре давления использовались тензорезисторы на основе НК кремния *p*-типа с $\rho = 0,005 \Omega \cdot \text{см}$. Поскольку толщина тензорезисторов намного меньше толщины балочки, при ее изгибе они испытывают одноосную деформацию растяжения (на верхней стороне балочки) и сжатия (на нижней стороне). Оба тензорезистора образуют полумост, выходной сигнал которого пропорционален давлению.

Проведенные нами исследования [1, 4, 6] показали, что наиболее подходящим материалом для упругих элементов сенсоров механических величин с кремниевыми тензорезисторами для криогенных температур является железоникелевый сплав — инвар типа 36Н, коэффициент термического расширения (КТР) которого максимально близок к КТР кремния при низких температурах. Поэтому упругий элемент тензомодуля изготавливался из инвара. Для крепления тензорезисторов использовался лак ВЛ-931 с температурой полимеризации 180°C , обладающий хорошими упругими свойствами при низких температурах.

Зависимости выходного сигнала разработанного сенсора от давления криогенной среды (жидкого азота и жидкого гелия) приведены на рис. 6. Основные параметры разработанных сенсоров давления следующие:

Диапазон измеряемых давлений	от $0\ldots 1 \cdot 10^5$ Па
	до $0\ldots 10$ МПа
Диапазоны рабочих температур, К	$4,2\ldots 300$
	и $4,2\ldots 100$
Выходной сигнал (без усиления) при	
$U_{\text{пит}} = 2$ В и максимальном давлении,	
мВ	$40\ldots 50$ при 300°K
	и $90\ldots 110$ при
	$4,2^\circ\text{K}$
Собственная частота сенсора, кГц	≈ 17

Разработанные сенсоры использовались, в частности, для измерения давления жидкого гелия в циркуляционных системах охлаждения сверхпроводящего магнита в установке ТОКАМАК.

На основе сенсора давления разработан также сенсор уровня криогенных жидкостей с чувствительностью приблизительно $0,25$ мВ/В на 1 мм жидкого азота [6].

Высокотемпературные сенсоры давления

Использование разработанных тензорезисторов на основе НК кремния с платиновыми контактами открыло возможности для создания высокотемпературных сенсоров механических величин. Поскольку сам кремниевый тензорезистор работо-

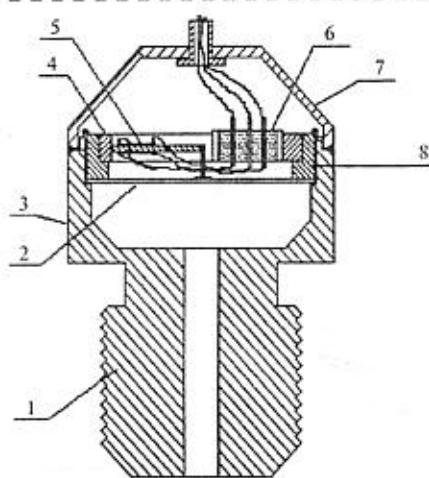


Рис. 5. Конструкция сенсора давления:
1 — канал подвода давления; 2 — мембрана; 3 — корпус; 4 — тензомодуль; 5 — консольная балочка с тензорезисторами; 6 — металлокерамический токовывод; 7 — крышка корпуса; 8 — обойма

пературах до 4,2 К, в сильных магнитных полях до 5 Тл, при высоких температурах до +400 °C, воздействии электронного облучения, а также в широком диапазоне упругих деформаций от 0,01 до 1 %. Пьезорезистивные сенсоры давления тензомодульной конструкции с тензорезисторами на основе НК кремния, благодаря использованию специальных сплавов для изготовления упругих элементов сенсоров и методов крепления тензорезисторов, а также свойств самих тензорезисторов, могут использоваться в различных температурных диапазонах от измерения давления криогенных жидкостей до измерения давления газов, нагретых до высоких температур. При этом благодаря высокой собственной частоте и малым размерам эти сенсоры могут использоваться для исследования различных динамических процессов в газах и жидкостях, внося минимальные искажения в исследуемую среду.

Список литературы

1. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al. Silicon whiskers for mechanical sensors. Sensors and Actuators. 1992. Vol. A 30. № 1–2. P. 27–33.
2. Voronin V. A., Maryamova I. I. and Ostrovskaya A. S. Morphology and structure especialities of semiconductor whiskers grown by CVD-method. Crystal Properties and Preparation. 1991. Vol. 36–36. P. 340–348.
3. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука. 1972. 584 с.
4. Maryamova I., Lavitska E., Tykhan M. et al. Semiconductor and mechanical sensors for adverse and dynamic conditions. IMEKO World Congress Proceedings Finland. 1997. Vol. IXA. P. 99–103.
5. Maryamova I., Pankov Y. Silicon sensors for enlarged strain measurements. 44th Intern. Scientific Colloquium, TU Ilmenau, Germany. 1999. P. 248–250.
6. Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E. et al. Low-temperature Semiconductor sensors // Sensors and Actuators. 2000. Vol. A 85. № 1–3. P. 153–157.

УДК 502.5:543.27:537.228.1:543.9

Т. Н. Ермолова, д-р хим. наук,
Е. Н. Калмыкова, канд. хим. наук,
Т. Л. Лаврентьева, канд. хим. наук,
Липецкий государственный технический
университет

ПЬЕЗОКВАРЦЕВЫЕ БИОСЕНСОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОДЕ И ВОЗДУХЕ

Исследованы особенности применения ферментных препаратов в качестве покрытий масс-чувствительных пьезокварцевых биосенсоров для определения фенола, карбамида и фосфорорганических токсикантов в воде и воздухе; установлены пределы обнаружения токсичных соединений.

В последнее время для контроля за содержанием примесей в объектах пищевой, микробиологической и фармацевтической промышленности активно развиваются ферментативные методы анализа, характеризующиеся высокой чувствительностью, экспрессностью, а главное — специфичностью. Работа с ферментными реагентами осложняется их лабильностью, поэтому практическое применение нашли в первую очередь наиболее устойчивые ферменты, например, глюкозооксидаза, холинэстераза сыворотки крови лошади, эритроцитов крови человека и др. [1]. Для повышения устойчивости и сохранения активности ферменты иммобилизуют на твердых носителях путем физической адсорбции, включения в гель или полимерную матрицу и ковалентного связывания с применени-

ем "сшивающего реагента", в качестве которого наиболее часто используют глутаровый альдегид. Более подробно методы иммобилизации разработаны для селектирующих мембран электрохимических сенсоров (электродов, амперометрических датчиков), интенсивно развивающихся в последнее время [2].

Электрохимические сенсоры, как правило, предназначены для косвенного контролирования концентрации определяемых соединений. Например, при определении фенолов с использованием биферментной системы, включающей оксидазу и пероксидазу, аналитический отклик фиксируется по количеству выделяющегося кислорода [1].

Ферментные пьезокварцевые биосенсоры (ПКБ) к настоящему времени еще не получили достаточно широкого распространения. Их преимущество — возможность прямого определения токсичных соединений по реакциям ингибиции или фермент-субстратного взаимодействия (нерасторимые продукты сорбируются на поверхности пьезокварцевого датчика). При этом по сравнению с электрохимическими сенсорами существенно уменьшается время отклика и увеличивается чувствительность определения. Аналитическим откликом ПКБ является изменение частоты колебаний сенсора вследствие увеличения массы покрытия. Поэтому к методам иммобилизации ферментов на таких сенсорах предъявляются особые требования — высокая степень адгезии ферментного покрытия к поверхности электрода и неизменность массы покрытия при длительной эксплуатации в воде. В литературе подробно описаны методы иммобилизации ферментов на поверхности золотых электродов [3], а иммобилизация на

пературах до 4,2 К, в сильных магнитных полях до 5 Тл, при высоких температурах до +400 °C, воздействии электронного облучения, а также в широком диапазоне упругих деформаций от 0,01 до 1 %. Пьезорезистивные сенсоры давления тензомодульной конструкции с тензорезисторами на основе НК кремния, благодаря использованию специальных сплавов для изготовления упругих элементов сенсоров и методов крепления тензорезисторов, а также свойств самих тензорезисторов, могут использоваться в различных температурных диапазонах от измерения давления криогенных жидкостей до измерения давления газов, нагретых до высоких температур. При этом благодаря высокой собственной частоте и малым размерам эти сенсоры могут использоваться для исследования различных динамических процессов в газах и жидкостях, внося минимальные искажения в исследуемую среду.

Список литературы

1. Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al. Silicon whiskers for mechanical sensors. Sensors and Actuators. 1992. Vol. A 30. № 1–2. P. 27–33.
2. Voronin V. A., Maryamova I. I. and Ostrovskaya A. S. Morphology and structure especialities of semiconductor whiskers grown by CVD-method. Crystal Properties and Preparation. 1991. Vol. 36–36. P. 340–348.
3. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука. 1972. 584 с.
4. Maryamova I., Lavitska E., Tykhan M. et al. Semiconductor and mechanical sensors for adverse and dynamic conditions. IMEKO World Congress Proceedings Finland. 1997. Vol. IXA. P. 99–103.
5. Maryamova I., Pankov Y. Silicon sensors for enlarged strain measurements. 44th Intern. Scientific Colloquium, TU Ilmenau, Germany. 1999. P. 248–250.
6. Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E. et al. Low-temperature Semiconductor sensors // Sensors and Actuators. 2000. Vol. A 85. № 1–3. P. 153–157.

УДК 502.5:543.27:537.228.1:543.9

Т. Н. Ермолова, д-р хим. наук,
Е. Н. Калмыкова, канд. хим. наук,
Т. Л. Лаврентьева, канд. хим. наук,
Липецкий государственный технический
университет

ПЬЕЗОКВАРЦЕВЫЕ БИОСЕНСОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОДЕ И ВОЗДУХЕ

Исследованы особенности применения ферментных препаратов в качестве покрытий масс-чувствительных пьезокварцевых биосенсоров для определения фенола, карбамида и фосфорорганических токсикантов в воде и воздухе; установлены пределы обнаружения токсичных соединений.

В последнее время для контроля за содержанием примесей в объектах пищевой, микробиологической и фармацевтической промышленности активно развиваются ферментативные методы анализа, характеризующиеся высокой чувствительностью, экспрессностью, а главное — специфичностью. Работа с ферментными реагентами осложняется их лабильностью, поэтому практическое применение нашли в первую очередь наиболее устойчивые ферменты, например, глюкозооксидаза, холинэстераза сыворотки крови лошади, эритроцитов крови человека и др. [1]. Для повышения устойчивости и сохранения активности ферменты иммобилизуют на твердых носителях путем физической адсорбции, включения в гель или полимерную матрицу и ковалентного связывания с применени-

ем "сшивающего реагента", в качестве которого наиболее часто используют глутаровый альдегид. Более подробно методы иммобилизации разработаны для селектирующих мембран электрохимических сенсоров (электродов, амперометрических датчиков), интенсивно развивающихся в последнее время [2].

Электрохимические сенсоры, как правило, предназначены для косвенного контролирования концентрации определяемых соединений. Например, при определении фенолов с использованием биферментной системы, включающей оксидазу и пероксидазу, аналитический отклик фиксируется по количеству выделяющегося кислорода [1].

Ферментные пьезокварцевые биосенсоры (ПКБ) к настоящему времени еще не получили достаточно широкого распространения. Их преимущество — возможность прямого определения токсичных соединений по реакциям ингибиции или фермент-субстратного взаимодействия (нерасторимые продукты сорбируются на поверхности пьезокварцевого датчика). При этом по сравнению с электрохимическими сенсорами существенно уменьшается время отклика и увеличивается чувствительность определения. Аналитическим откликом ПКБ является изменение частоты колебаний сенсора вследствие увеличения массы покрытия. Поэтому к методам иммобилизации ферментов на таких сенсорах предъявляются особые требования — высокая степень адгезии ферментного покрытия к поверхности электрода и неизменность массы покрытия при длительной эксплуатации в воде. В литературе подробно описаны методы иммобилизации ферментов на поверхности золотых электродов [3], а иммобилизация на

электродах, изготовленных из других металлов, менее изучена.

Известно применение ферментных препаратов также для диагностики газовых сред. Однако существуют противоречивые мнения о проявлении ферментативной специфичности сухих ферментных пленок в газовом анализе [4, 5].

Цель данной работы — исследование особенностей применения ферментов в пьезокварцевых биосенсорах, предназначенных для определения токсичных органических соединений в воде, и оценка возможности использования ферментных препаратов в качестве покрытий для анализа газовых сред.

Применение ПКБ для анализа воздуха

В качестве покрытий ПКБ (пьезокварцевые резонаторы АТ-резона с частотой колебаний 9 МГц, с серебряными электродами) применяли коммерческий препарат холинэстеразы (ХЭ). Для получения покрытия на поверхность электрода микрошприцем наносили 1 мкл раствора фермента в воде (0,1—0,5 мас %) или фосфатном буфере ($\text{pH} = 7,2$) и выдерживали до постоянной массы в термостате (40°C) или экскаторе при температуре проведения опыта.

Увеличение массы покрытия рассчитывали с помощью уравнения Зауэрбрея [6] по изменению частоты колебаний сенсора.

Фактические массы покрытий ПКБ ($\Delta m_{\text{экспер}}$) превышают ожидаемые значения ($\Delta m_{\text{теор}}$), рассчитанные с учетом концентрации раствора ХЭ при полном удалении растворителя. В табл. 1 для сравнения приведены аналогичные данные, полученные для синтетических и биополимерных покрытий (полиэтиленгликоля — ПЭГ, полисахарида — ПС и неспецифического белка бычьего сывороточного альбумина — БСА).

Таблица 1
Массы покрытий ПКБ

Модификаторы	$\Delta m_{\text{теор}}$, мкг	$\Delta m_{\text{экспер}}$, мкг
ПЭГ		$5,62 \pm 0,12$
БСА	2	$3,42 \pm 0,10$
ПС		$2,15 \pm 0,09$
ХЭ		$0,83 \pm 0,13$

Превышение массы пленочных покрытий по сравнению с рассчитанными величинами объясняется неполным удалением воды из гидрофильных полимерных структур, что также способствует сохранению гибкости и эластичности пленок.

Перечень исследованных фосфорорганических соединений (ФОС) приведен в табл. 2.

Для оценки эффективности покрытий на основе ХЭ и других полимерных материалов использовали следующие характеристики:

- изменение частоты колебаний сенсора Δf , Гц;

Таблица 2
Перечень исследованных фосфорорганических соединений

Название	Сокращенное обозначение	Химическая формула	ПДК, мг/м ³
Дихлофос	ДХФ	$(\text{CH}_3\text{O})_2\text{PO}-\text{OCH}=\text{CCl}_2$	0,2
Ди(2-этилгексил)фенилфосфат	ДАФФ	$(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{C}(\text{C}_2\text{H}_5)\text{CH}_2\text{O})_2\text{P}$ $\text{O}-\text{OC}_6\text{H}_5$	1
Динизобутилфенилфосфат	ДБФ	$(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_2\text{PO}-\text{OC}_6\text{H}_5$	1
Карбамид	КБ	NH_2CONH_2	0,01*
Карбофос	КФ	$(\text{CH}_3\text{O})_2\text{PS}-\text{S}-\text{CC}-$ $(\text{CH}_2\text{COOC}_2\text{H}_5)-\text{HCOOC}_2\text{H}_5$	0,5
Трибутилфосфат	ТБФ	$(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}$	0,01*
Трикрезилфосфат	ТКФ	$(\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{O})_3\text{PO}$	0,1
Фенол	Ф	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	0,3 0,001*

* ПДК в воде, мг/л.

- концентрационную чувствительность A , рассчитанную как отношение Δf к концентрации ФОС в воздухе, Гц/(г/м³);
- удельную чувствительность S (A , отнесенную к единице массы пленочного покрытия, Гц/[(г/м³)/мкг], табл. 3.

Концентрации ФОС в газовой фазе (C_A) соответствовали давлению насыщенных паров при стандартной температуре (290 К).

Аналитический отклик сенсора, модифицированного холинэстеразой, отражает суммарный вклад различных факторов — физической и хемосорбции и специфического взаимодействия ингибитора с активным центром фермента. Мера вклада каждого фактора связана с концентрацией определяемых ФОС. Например, при детектировании ДХФ

Таблица 3
Аналитические отклики (Δf), концентрационные чувствительности ФОС (A) и пределы обнаружения ФОС (ПрО) ПКБ, модифицированных ХЭ

Аналит	C_A , мг/м ³	$\Delta f_{\text{ХЭ}}$	ПрО, мг/м ³	$\Delta f_{\text{БСА}}$	$\Delta f_{\text{ПС}}$	$\Delta f_{\text{ПЭГ}}$
		$A_{\text{ХЭ}}$				
ДХФ	145,20	3670 25	1,2	3120 20	4320 30	3120 20
КФ	2,00	2980 1490	0,02	780 70	1190 600	940 470
ТКФ	0,17	1940 11420	0,003	470 2800	550 3220	460 2760
ДАФФ	2,28	1570 690	0,044	550 240	630 280	530 230
ДБФ	0,42	1100 2650	0,011	690 1650	730 1740	680 1620
Ф	3300	1880 $0,6$	53,0	—	—	—

($C_{DXF} = 145,20 \text{ мг}/\text{м}^3$) физическая и химическая сорбция превалируют над специфическим ферментным взаимодействием, вследствие чего аналитический отклик, полученный с применением сенсора, модифицированного ХЭ, сопоставим с аналогичными величинами на синтетических и биополимерных покрытиях. Именно поэтому авторы в работе [5] не выявили ферментной специфичности ХЭ-покрытий, поскольку проводили исследования в области высоких концентраций ФОС в воздухе.

При детектировании других ФОС ($C_A = 2,2 \pm 0,17 \text{ мг}/\text{м}^3$) зафиксирован больший аналитический отклик и в 2–5 раз более высокая чувствительность холинэстеразных сенсоров по сравнению с сенсорами, модифицированными другими полимерами, в том числе БСА, имеющим так же, как и ХЭ, белковую природу. Это, на наш взгляд, связано с проявлением ферментной специфичности холинэстеразы. Кроме того, при детектировании фенола, не являющегося ингибитором ХЭ, значение A существенно ниже (в 80–10 000 раз), чем для любого из исследованных ФОС.

Зависимость аналитических сигналов от строения ФОС наглядно иллюстрирует рис. 1, на котором сопоставлены значения удельных чувствительностей. Максимальный отклик ПКБ отмечен для менее летучих нормальных эфиров фосфорной кислоты. Изменение чувствительности биосенсоров, модифицированных ХЭ, обратно пропорционально летучести детектируемых ФОС:

$$C_A(DXF) < C_A(DAFF) < C_A(KF) < C_A(DFF) < C_A(TBF) < C_A(TKF).$$

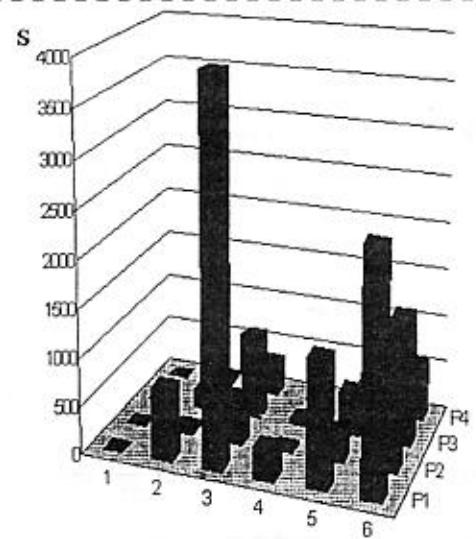


Рис. 1. Сравнение удельной чувствительности S определения ФОС ($\text{Ги}/[\text{г}/\text{м}^3]/\text{мкг}$) на различных покрытиях: ХЭ (P1), БСА (P2), ПС (P3), ПЭГ (P4) и соединений: DXF (1), КФ (2), ТКФ (3), ДАФФ (4), ДФФ (5), ТБФ (6)

Таким образом, ферментные ПКБ не могут применяться для определения высоких концентраций ФОС в воздухе. В то же время биосенсоры на основе ХЭ характеризуются высокой чувствительностью и селективностью и позволяют определять содержание в газовой среде таких фосфорогенных токсикантов, как карбофос, трикрезилфосфат, диизобутилфенилфосфат, ди(2-этилгексил)фенилфосфат на уровне ПДК и ниже (табл. 3).

Применение ПКБ для диагностики водных сред

Изучено применение ПКБ для определения в водных средах ТБФ, карбамида и фенола. При определении первых двух соединений применяли сенсор на основе ХЭ, а при детектировании фенола — сенсор, модифицированный ферментсодержащими препаратами, выделенными нами из различных растительных материалов.

Использование неочищенных ферментсодержащих препаратов в качестве покрытий ПКБ существенно снижает стоимость биосенсоров. Обычно для этих целей применяют ферменты в виде гомогенатов, тонких срезов тканей растений и животных, содержащих ферменты нужного класса [7]. Выбор растительных объектов (картофеля, яблока, пшеницы, ржи, корня хрена) обусловлен присутствием в их составе полифенолоксидазы и пероксидазы (или их суммы), поскольку фенол является для этих ферментов, соответственно, субстратом или ингибитором [8].

Для получения ферментсодержащих препаратов растительный источник измельчали на холоде, гомогенат настаивали с водой или фосфатным буфером ($\text{pH} = 6,8; 7,4$), осадок удаляли фильтрованием или на центрифуге. Надосадочную фракцию обрабатывали сульфатом аммония или этанолом. Полученные при этом осадки растворяли в минимальном количестве воды, дialisовали для удаления низкомолекулярных примесей и высушивали под вакуумом при пониженной температуре. Гомогенность полученных экстрактов оценивали гель-хроматографией на сепадексе G-100. Выделенные образцы характеризуются близкими значениями активности и представляют собой гетерогенные по молекулярной массе белковые смеси. Контроль элюирования фракций осуществляли спектрофотометрически в УФ области спектра (280 нм) и окрашиванием с нингидрином (рис. 2).

При анализе водных сред к покрытиям ПКБ предъявляются следующие требования: сохранение постоянной массы ферментного пленочного покрытия в течение необходимого для проведения анализа времени, а также увеличение аналитического отклика только за счет специфичного взаимодействия и физической сорбции. Первое требование выполняется при правильном выборе способа иммобилизации ферментов. Экспериментальная оценка существующих методик иммобилизации

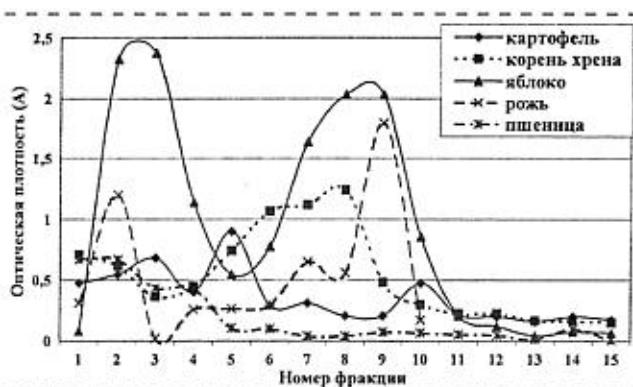


Рис. 2. Гель-хроматография на сефадексе G-100 ферментных препаратов, выделенных из растительных образцов (объем каждой фракции — 2 мл)

показала, что для серебряных электродов предъявляемым требованиям отвечают покрытия, сформированные золь-гель методом [9, 10].

Иммобилизация ферментов осуществляется при этом путем ковалентной пришивки с помощью глутарового альдегида к слою тетраэтиксиланы, предварительно нанесенного на поверхность электрода сенсора. Схема иммобилизации представлена на рис. 3.

Аналитический отклик ПКБ регистрировали после выдерживания сенсора в различных концентрациях анализа в течение фиксированного време-

ни, промывания дистиллированной водой и высушивания до постоянной массы.

Для повышения надежности и нивелирования неспецифической сорбции примесных соединений, присутствующих в матрице, измерение сигнала индикаторного сенсора можно осуществлять по дифференциальной схеме по отношению к сенсору сравнения, содержащему инактивированный фермент.

Выделенные нами ферментсодержащие препараты проявляют различную активность по отношению к фенолу (рис. 4). Для сравнения на графике приведены ПрО фенола на синтетическом полимере полизиленгликольфталате (ПЭГФ).

Максимальный аналитический сигнал при определении фенола получен с использованием ПКБ на основе препаратов корня хрена и семян ржи. Он связан с протеканием на его поверхности реакций ингибирования или фермент-субстратного взаимодействия, а также с сорбцией покрытием ПКБ анализа и продуктов его окисления. При использовании ферментсодержащего препарата корня хрена, включающего преимущественно пероксидазу, на поверхности сенсоров протекают реакции ингибирования фенолом активных центров фермента. При применении препаратов, выделенных из семян ржи и содержащих в значительном количестве полифенолоксидазу, параллельно протекает и реакция фермент-субстратного взаимодействия, сопровождающаяся сорбцией продуктов окисления фенола. Поэтому при барботировании воздуха через анализируемую пробу аналитический отклик такого сенсора существенно увеличивается.

Значения Δf зависят от времени экспозиции сенсора в водных растворах, содержащих различные концентрации фенола (рис. 5). Для детектирования фенола на уровне 0,25 ПДК и ниже время экспозиции сенсора, модифицированного препаратом корня хрена, составляет 30 мин.

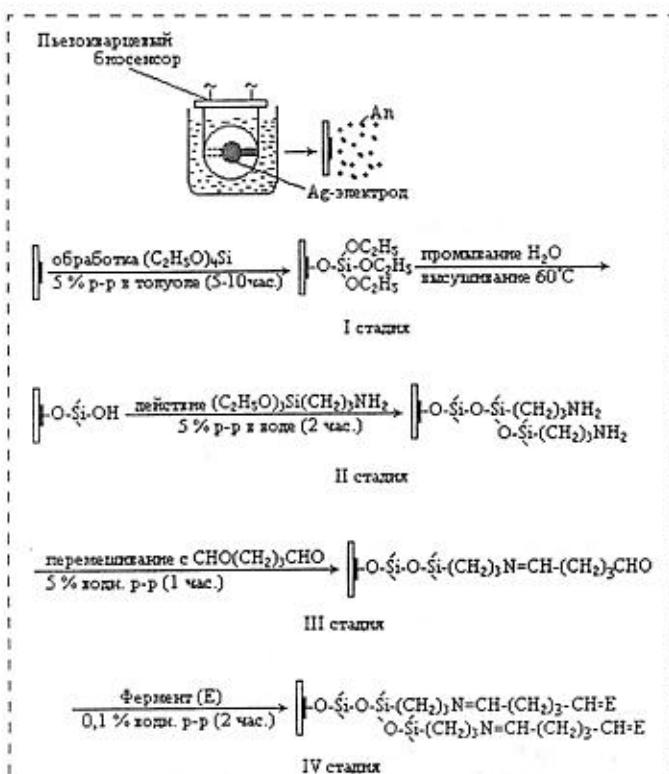


Рис. 3. Схема иммобилизации ферментного препарата на поверхности ПКБ

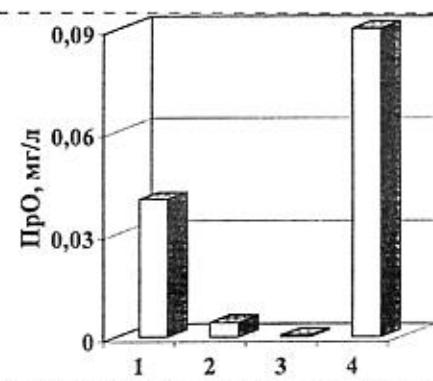


Рис. 4. Сопоставление пределов обнаружения фенола в воде биосенсорами, модифицированными ферментсодержащими препаратами: ржи — с осадителем $(NH_4)_2SO_4$ (1); ржи — с осадителем C_2H_5OH (2); корня хрена без осадителя (3) и с полизиленгликольфталатом (4)

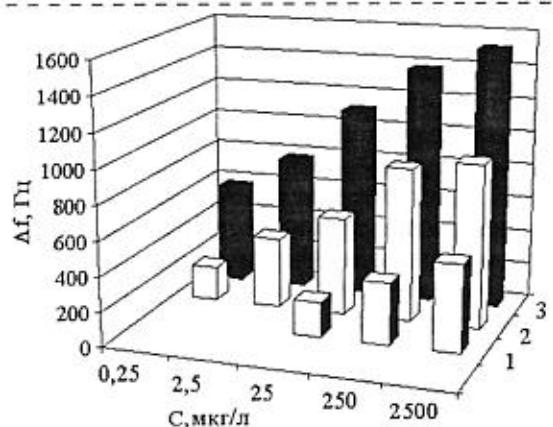


Рис. 5. Влияние времени экспозиции сенсора на основе препарата корня хрена в растворах с различной концентрацией фенола на величину Δf биосенсора:
1 — 15 мин, 2 — 30 мин, 3 — 1 ч

Концентрация ферментсодержащего препарата, используемого на стадии иммобилизации, должна выбираться с учетом содержания фенола в анализируемом растворе (рис. 6). При определении фенола в пробах на уровне ПДК и ниже необходимо проводить иммобилизацию из раствора препарата с концентрацией 0,1 мг/мл; при содержании фенола в диапазоне 0,25–0,75 мг/л — из растворов с более высокой концентрацией (1 мг/мл).

Нижняя граница определяемых содержаний фенола с помощью биосенсоров, модифицированных ферментсодержащими препаратами корня хрена и ржи (при барботировании воздуха через измерительную ячейку), составляет 0,4 ПДК (время единичного определения фенола — 15 мин).

Однако неоднородность неочищенных ферментсодержащих препаратов снижает воспроизводимость результатов определения токсикантов, требует частой калибровки сенсоров по стандартным

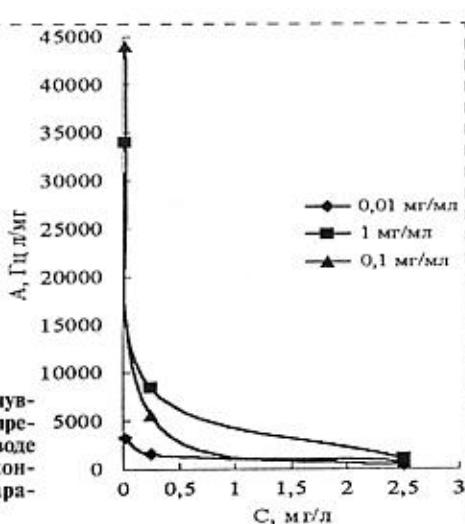


Рис. 6. Изменение чувствительности A определения фенола в воде в зависимости от концентрации C препарата корня хрена

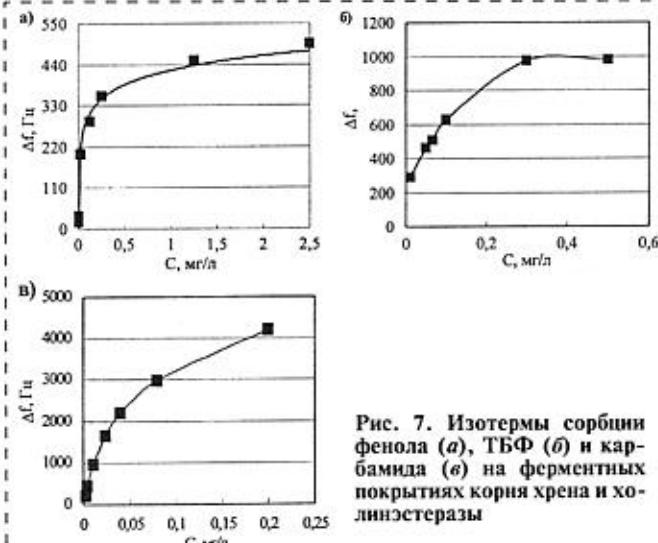


Рис. 7. Изотермы сорбции фенола (а), ТБФ (б) и карбамида (в) на ферментных покрытиях корня хрена и холинэстеразы

растворам фенола, а также уменьшает чувствительность определения по сравнению с сенсорами, модифицированными высокоочищенными ферментами (рис. 7). Так, например, при применении биосенсоров, модифицированных коммерческой ХЭ, регистрируется в 10 раз более высокие значения Δf в растворах с одинаковой концентрацией токсикантов.

Как показывают изотермы сорбции фенола, ТБФ и карбамида, пьезокварцевые биосенсоры могут применяться для анализа водных растворов в достаточно широком диапазоне концентраций, в том числе для детектирования не только фенола, но также ФОС и карбамидов на уровне ПДК.

Список литературы

1. Никольская Е. Б., Евтушин Г. А., Шеховцова Т. Н. Проблемы использования ферментов в анализе объектов окружающей среды // Журн. аналит. химии. 1994. Т. 49. № 5. С. 452–461.
2. Евтушин Г. А., Будников Г. К., Галиметдинов Ю. Г. и др. Амперометрическое определение эфиро-тиохолина в присутствии бутирилхолинэстеразы // Журн. аналит. химии. 1996. Т. 51. № 4. С. 424–427.
3. Darder M. J., Casero E. D., Diaz J. H. Concentration Dependence of Aggregate Formation upon Adsorption of 5-(Octyldithio)-2-nitrobenzoic Acid on Gold Electrodes // Langmuir. 2000. V. 16. P. 9804–9811.
4. Guilbault G. G., Jordan M. J. Analytical uses of piezoelectric crystals: a review // Anal. Chem. 1988. V. 19. № 1. P. 1–28.
5. Milanko O. S., Milinković S. A., Rajaković L. V. Evaluation of coating materials used on piezoelectric sensors for the detection of organophosphorus compounds in the vapour phase // Anal. Chim. Acta. 1992. V. 269. P. 289–300.
6. Sauerbrey G. Verwendung von Schwingquarzen zur Wagung dünner Schichten und zur Mikrowagung // Zeitschrift für physik. 1959. Bd. 155. P. 205–222.
7. Bunde R. L., Jarvi E. J., Rosentreter J. J. Piezoelectric quartz crystal biosensors: review // Talanta. 1998. V. 46. P. 1223–1236.
8. Шеховцова Т. Н., Лялюгин А. Л., Кондратьева Е. И. Использование пероксидаз различного происхождения для определения фенолов // Журн. аналит. химии. 1994. Т. 49. № 12. С. 1317–1323.
9. Айлер Р. Химия кремнезема. М.: Мир. 1982. Т. 2. 712 с.
10. Фадеев А. Ю., Алешин Ю. К., Лисичкин Т. В. Адсорбционные свойства химически модифицированных пьезокварцевых резонаторов с пленочными кремнеземными покрытиями // Журн. физ. химии. 1994. Т. 68. № 3. С. 540–544.

УДК 621.38

В. В. Максименко, канд. физ.-мат. наук,
 Б. Ш. Галимов, канд. физ.-мат. наук,
 НИФХИ им. Л. Я. Карпова,
 П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
 Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

ФРАКТАЛЬНЫЕ КЛАСТЕРЫ И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА. ЛОКАЛИЗАЦИЯ СВЕТА, ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, "СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ" СВЕТА, "ТЕЛЕПОРТАЦИЯ"*

Исследовано явление антуановской локализации света в фрактальном кластере, состоящем из твердых наночастиц. Вычислено сечение локализации. Исследовано явление вынужденного излучения локализованного света из кластера. Предсказаны аномалии в распространении электромагнитного излучения в фрактальных системах. Показана возможность использования фрактальных кластеров для создания широкополосных микролазеров. Обсуждаются возможности интерпретации недавних экспериментов по квантовой телепортации на основе концепции локализованного света.

Введение

В статье подробно исследован механизм антуановской локализации света в фрактальном кластере и вычислено дифференциальное сечение процесса. Исследовано также явление индуцированного излучения из кластера локализованного в нем света, интересное с точки зрения перспектив создания фрактального микролазера. Кроме того, предсказан механизм беспрепятственного прохождения излучения через фрактальную систему, аналогичный явлению электронной сверхпроводимости. Концепция локализованного света может оказаться полезной в понимании физики так называемой квантовой телепортации информации.

1. Сечение локализации фотона в фрактальном кластере

Стандартный подход к вычислению сечения упругого рассеяния фотона системой частиц заключается в следующем. Сначала строится амплитуда упругого рассеяния фотона [1, 2]:

$$\begin{aligned} \mathfrak{I} = & \sqrt{\frac{2\pi c^2}{\omega_i V}} \sqrt{\frac{2\pi c^2}{\omega_f V}} e_{ia} \int e^{-ik_i r} P_{\alpha\beta}^a(\mathbf{r}, \mathbf{r}') e_{f\beta} e^{ik_f r'} d\mathbf{r} d\mathbf{r}' + \\ & + \sqrt{\frac{2\pi c^2}{\omega_i V}} \sqrt{\frac{2\pi c^2}{\omega_f V}} e_{ia} \int e^{-ik_i r} P_{\alpha\gamma}^a(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) D_{\gamma\gamma}^0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \times \\ & \times P_{v\beta}^b(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}') e_{f\beta} e^{ik_f r'} d\mathbf{r} d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 d\mathbf{r}' + \dots \end{aligned}$$

*Работа выполнена при поддержке гранта 521-98 МНТЦ и Совета по физике твердотельныхnanoструктур.

Здесь индексы a и b — координаты центров частиц (этот ряд продолжается как последовательным повторением индексов, так и их чередованием); k_i и k_f — волновые векторы падающего и рассеянного квантов ($k = \omega/c$); e — соответствующие им единичные векторы поперечной поляризации; V — нормировочный объем; P и D^0 — потенциал взаимодействия фотона с отдельной частицей и вакуумный фотонный пропагатор. Затем выполняется осреднение $|\mathfrak{I}|^2$ по координатам частиц. Вероятность упругого рассеяния W связана с $\langle |\mathfrak{I}|^2 \rangle$ "золотым правилом" Ферми:

$$W = 2\pi \int \langle |\mathfrak{I}|^2 \rangle \delta(\omega_i - \omega_f) \frac{dN}{d\omega_f} d\omega_f.$$

Здесь $dN/d\omega_f = \frac{V k_f^2 dk_f d\mathbf{n}_f}{(2\pi)^3 d\omega_f}$ — плотность состояний излучения, рассеянного в элемент телесного угла $d\mathbf{n}_f$ вдоль направления \mathbf{n}_f , где $dk_f = d\omega_f/c$. Дифференциальное сечение рассеяния получается из W делением на плотность потока падающего излучения, которая в используемой нами нормировке есть $2\pi c/V$.

Обычный вывод "золотого правила" следующий. Используется условие унитарности S -матрицы

$$i(\mathfrak{I}_{ab} - \mathfrak{I}_{ba}^*) = 2\pi \sum_c \mathfrak{I}_{ca}^* \mathfrak{I}_{cb} \delta(\omega_a - \omega_c), \quad (1)$$

где \mathfrak{I}_{ab} — амплитуда перехода из состояния a в состояние b , связанная с S -матрицей соотношением

$$S_{ab} = \delta_{ab} - 2\pi i \delta(\omega_a - \omega_b) \mathfrak{I}_{ab}.$$

Упруго рассеивающийся фотон (впрочем, как и налетающий) принадлежит непрерывному спектру, поэтому берется штурм от обеих частей соотношения (1). В результате

$$-\text{Im } \mathfrak{I}_{aa} = \pi \sum_c |\mathfrak{I}_{ac}|^2 \delta(\omega_a - \omega_c).$$

Если мы отождествим суммирование по промежуточным состояниям с интегрированием по состояниям промежуточного импульса

$$\sum_c \rightarrow \sum_{p_c} \rightarrow \int d\mathbf{p}_c / (2\pi)^3 = \int \frac{V p_c^2 d\mathbf{n}_c}{(2\pi)^3} \frac{dp_c}{d\omega_c} d\omega_c,$$

то

$$\int |\mathfrak{I}_{pp_c}|^2 \delta(\omega_a - \omega_c) \frac{dp_c}{(2\pi)^3} = \frac{V \omega^2}{(2\pi)^3 c^3} \int |\mathfrak{I}(\theta)|^2 d\mathbf{n}_c,$$

где $\omega = \omega_a$; θ — угол рассеяния. Отсюда следует хорошо известная оптическая теорема, связывающая полное сечение рассеяния

$$\sigma = \frac{V \omega^2}{(2\pi)^3 c^3} \int |\mathfrak{I}(\theta)|^2 d\mathbf{n}_c$$

с амплитудой рассеяния на нулевой угол $\Im(0)$

$$-\text{Im}\Im(0) = \pi\sigma.$$

Сечение рассеяния, естественно, — положительно определенная величина.

Иначе обстоит дело с сечением локализации. Локализованный фотон не принадлежит непрерывному спектру, поэтому имеет смысл говорить о вероятности его перехода из состояния a в состояние b . Мы не будем огрублять выражение (1) взятием шпура, а будем работать непосредственно с ним. В этом случае, переходя в импульсное представление, нетрудно получить следующее обобщение оптической теоремы:

$$i(\Im_{ab} - \Im_{ba}^*) = 2\pi\sigma_{ab}, \quad (2)$$

где

$$\sigma_{ab} = \frac{V_\omega^2}{(2\pi)^3 c^3} \int \Im_{ca}^* \Im_{cb} d\mathbf{n}_c \quad (3)$$

— полное сечение перехода фотона из состояния a в состояние b . Если состояния a и b принадлежат непрерывному спектру, индексы a и b можно снять, и мы возвращаемся к стандартной теории рассеяния. Если в схему рассеяния введены источник и детектор фотона, то, как мы видим, возможна комплекснозначность σ_{ab} .

Возвведение в квадрат модуля амплитуды рассеяния при вычислении сечения приводит к возникновению характерного "второго этажа" в диаграммах для сечения. Его появлению обычно не придается никакого физического смысла. Возможен, однако, иной взгляд на проблему. Что, если акт упругого рассеяния фотона устроен следующим образом? В работах [3, 4] нами было введено представление о переплетенных "жестких" антуановских звенях на траектории виртуального фотона, распространяющегося в системе рассеивателей. Предположим, что между произвольными источником и детектором излучения присутствует локализованный в фрактальном кластере фотон, схематически изображенный на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Его удерживает там переплетение этих самых звеньев или колец (рис. 2, см. третью сторону обложки). Сам акт рассеяния фотона мы предлагаем рассматривать как некое интерференционное состояние двух виртуальных фотонов, представленных на рис. 1, в процессе взаимодействия которых может образоваться связанное состояние этих фотонов. Это и есть локализованный фотон.

Амплитуда K взаимодействия пары виртуальных фотонов (рис. 2) описывается лестничным рядом (рис. 3, см. третью сторону обложки). Каждая "перекладина" этой лестницы есть большая группа S -блоков рис. 3 работы [4], спускающихся с верхнего и растущих с нижнего "берегов". Эта группа

состоит в точности из N_c частиц, причем каждая частица скоррелирована абсолютно со всеми частицами группы. Процедура суммирования сводится к решению уравнения Бете—Солпитера (рис. 3). Корреляторы на этом рисунке опущены, чтобы не загромождать его.

Свой вклад в рассеяние дают и так называемые несвязные диаграммы, в которых верхний и нижний "берега" не соединены никакими линиями. Эти диаграммы описывают когерентное рассеяние света кластером. Мы его рассматривать не будем, как и вклад в рассеяние связных диаграмм, чьи берега соединены более простым образом, например, с помощью обычных t -матриц. Учет таких диаграмм воспроизводит обычное рэлеевское рассеяние света частицами кластера.

Начнем с суммирования лестничного ряда, приведенного на рис. 3. После подстановки выражений для S и D работы [4] и интегрирований по частям ядро уравнения Бете—Солпитера записывается в виде

$$f_{\alpha\beta\gamma\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{N-1}, \mathbf{r}_N, \mathbf{r}_2) = \left(\frac{\omega}{4\pi c}\right)^4 |\bar{\epsilon}|^2 \times \\ \times \phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{N-1}, \mathbf{r}_N, \mathbf{r}_2) \nabla_{1,\alpha} \nabla_{N-1,\beta} Q(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{N-1}) \times \\ \times \nabla_{N,\sigma} \nabla_{2,\nu} Q(\mathbf{r}_N, \mathbf{r}_2), \quad (4)$$

где

$$\phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{N-1}, \mathbf{r}_N, \mathbf{r}_2) = |S_0|^{N/2} v^{-N} \int \Theta(R - |\mathbf{a}_1 - \mathbf{r}_1|) \times \\ \times \Theta(R - |\mathbf{a}_3 - \mathbf{r}_3|) \dots \Theta(R - |\mathbf{a}_{N-1} - \mathbf{r}_{N-1}|) \times \\ \times \Theta(R - |\mathbf{a}_2 - \mathbf{r}_2|) \Theta(R - |\mathbf{a}_4 - \mathbf{r}_4|) \dots \times \\ \times \Theta(R - |\mathbf{a}_N - \mathbf{r}_N|) \prod_{i < j (i=1)}^{N-1} g_2(\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_j) \prod_{k=1}^N d\mathbf{a}_k \quad (5)$$

$$Q(\mathbf{r}) = |\mathbf{r}|^{-1}.$$

Само уравнение выглядит следующим образом:

$$K_{\alpha\beta\gamma\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) = f_{\alpha\beta\gamma\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) + \\ + \int f_{\alpha\gamma\delta\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_5, \mathbf{r}_8, \mathbf{r}_3) D_{\gamma\nu}(\mathbf{r}_5, \mathbf{r}_6) D_{\delta\nu}^*(\mathbf{r}_7, \mathbf{r}_8) \times \\ \times K_{\mu\beta\sigma\varepsilon}(\mathbf{r}_6, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_7) d\mathbf{r}_5 d\mathbf{r}_6 d\mathbf{r}_7 d\mathbf{r}_8. \quad (6)$$

Успех в его решении связан с поиском решения в виде

$$K_{\alpha\beta\gamma\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) = f_{\alpha\beta\gamma\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) + \\ + \nabla_{1,\alpha} \nabla_{2,\beta} \nabla_{4,\sigma} \nabla_{3,\nu} W(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3). \quad (7)$$

Тогда после подстановки выражения (7) в уравнение (6) и интегрирования по частям, пренебрегая всякий раз градиентами функций ϕ по сравнению с сингулярными двойными градиентами функций Q , имеем для K следующее простое выражение:

$$K_{\alpha\beta\sigma\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) = \left(\frac{\omega}{4\pi c}\right)^4 |\tilde{\epsilon}|^2 [\phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) \times \\ \times \nabla_{1,\alpha} \nabla_{2,\beta} Q(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \nabla_{4,\sigma} \nabla_{3,\nu} Q(\mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) + \\ + \frac{\phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3)\phi(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4)}{1 - \phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3)} \nabla_{1,\alpha} \nabla_{2,\beta} Q(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \times \\ \times \nabla_{4,\sigma} \nabla_{3,\nu} Q(\mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3)], \quad (8)$$

где $\phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3) = \phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{r}_3)$.

Связь K с дифференциальным сечением рассеяния следующая:

$$\frac{d\sigma}{dn_f} = e_i e_f e_{f\sigma} e_{i\nu} \int K_{\alpha\beta\sigma\nu}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_3) \times \\ \times \exp[i(-k_i \mathbf{r}_1 + k_f \mathbf{r}_2 - k_f \mathbf{r}_4 + k_i \mathbf{r}_3)] d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 d\mathbf{r}_3 d\mathbf{r}_4. \quad (9)$$

Кратные интегралы в (9) сводятся к одному единственному

$$\frac{d\sigma}{dn_f} = \frac{1}{4\pi} |\tilde{\epsilon}|^2 \frac{\omega^2 V V_c}{c^4} \frac{1 + 2(e_i e_f)^2}{15} \times \\ \times \int_0^\infty \frac{\sin \beta t}{\beta t} t^2 \frac{\phi(t)}{1 - \phi(t)} dt, \quad (10)$$

где $\beta = qL_c$; $q = k_i - k_f$; V — объем кластера; V_c — объем корреляционного блока и $t = x/L_c$.

В рамках наших приближений для ξ (см. уравнение (18) работы [4])

$$\phi(t) \approx |S_0|^{\frac{N_c}{2}} g_2^{\frac{N_c}{2}} \left(\frac{N_c}{2} - 1\right) (L_c) g_2^{\frac{N_c}{2}} (r) \approx \\ \approx t^{-s} \exp(-\delta t), \quad (11)$$

где

$$\delta = N_c^2/4, \\ s = (3 - d) N_c^2/4. \quad (12)$$

После подстановки ϕ в (10) интеграл приводится к виду

$$\int_0^\infty \frac{\sin \beta t}{\beta t} t^2 \frac{dt}{t^s \exp(\delta t) - 1}. \quad (13)$$

Интеграл (13) расходится, но существует в смысле главного значения. Особенности подынтегральной функции определяются корнями уравнения

$$(3 - d) \ln t = -t. \quad (14)$$

Это уравнение имеет один корень, лежащий на действительной оси. Обозначим его t_0 . Значения t_0 в зависимости от d представлены на рис. 4.

С точностью до членов порядка $((3 - d)/e)^{\frac{N_c^2}{4}}$ нетрудно получить следующее выражение для

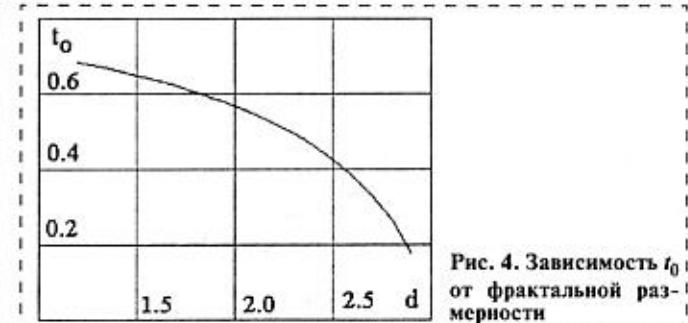


Рис. 4. Зависимость t_0 от фрактальной разности

вклада "лестниц" в дифференциальное сечение упругого рассеяния света кластером:

$$\frac{d\sigma}{dn_f} = \frac{1 + 2(e_i e_f)^2}{60} N_c^{\frac{3-2d}{d}} \frac{\frac{3-2d}{2} N_c^{\frac{3-2d}{2}}}{c^4} |\epsilon - 1|^2 \frac{\omega^4 R^6}{c^4} \times \\ \times \left[-\frac{1}{\beta} \frac{d}{d\beta} \delta(\beta) + i \frac{t_0^3 \sin \beta t_0}{s \beta t_0} \right], \quad (15)$$

где $\beta = 2 \frac{\omega L_c}{c} \sin \frac{\theta}{2}$ и θ — угол рассеяния.

2. Свойства локализованного света

При $\theta \neq 0$ дифференциальное сечение рассеяния становится чисто мнимым (действительные поправки к δ -функции в (15) порядка $\exp(-N_c^2)$, и ими вполне можно пренебречь по сравнению с мнимой частью). Это означает, что при $\theta \neq 0$ любой рассеявшаяся "вбок" фотон улавливается кластером и начинает колебаться вдоль соответствующего вектора n_f . В этом нетрудно убедиться, воспользовавшись следующими соображениями.

Запишем уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} I = 0, \quad (16)$$

где ρ — плотность фотонов внутри воображаемой замкнутой поверхности, окружающей кластер; I — плотность потока излучения. Если проинтегрировать это уравнение по объему, то число фотонов в нем N_{ph} связано с потоком излучения J через границу соотношением

$$\frac{\partial N_{ph}}{\partial t} + J = 0. \quad (17)$$

Поток J_{n_f} рассеянного излучения в направлении единичного вектора n_f связан с дифференциальным сечением рассеяния $d\sigma/dn_f$ и плотностью потока падающего излучения I_0 стандартным соотношением

$$J_{n_f} = I_0 \frac{d\sigma}{dn_f} \quad (18)$$

и при любом $\theta \neq 0$

$$J_{n_f} = iI_0 \operatorname{Im} \frac{d\sigma}{dn_f}. \quad (19)$$

Мнимость J_{n_f} означает следующее:

- этот "рассеянный" поток вовсе не выходит из кластера, а осциллирует со временем

$$J_{n_f} \sim \exp(-i\omega t); \quad (20)$$

- число фотонов N_0 , находящихся в кластере, также осциллирует:

$$N \sim \bar{N}_0 \exp(-i\omega t). \quad (21)$$

Причина удержания этих фотонов в кластере — зацепление их антуановских колец;

- плотность потока падающего на кластер излучения также со временем осциллирует:

$$I_0 \sim \bar{I}_0 \exp(-i\omega t). \quad (22)$$

В этом нет ничего удивительного. В той схеме рассеяния, которая предложена на рис. 1, это заложено с самого начала.

Таков физический смысл появления мнимой составляющей у сечения упругого рассеяния. Именно она описывает возможность локализации фотона в системе источник—объект—детектор. Еще раз напомним, что комплекснозначность сечения есть прямое следствие оптической теоремы (2)–(3).

На рис. 5 показана характерная зависимость полного сечения локализации s - и p -поляризованного света от длины волны. Соответствующие аналитические выражения особенно просто выглядят для света s -поляризации. Полное сечение локализации в этом случае определяется выражением

$$\sigma_a = \frac{1}{5} |\epsilon - 1|^2 \frac{t_0}{3-d} \frac{\omega^2 R^4}{c^2} N_c^{\frac{3-2d}{2d}} \times \\ \times \left(1 - \cos \left(2 \frac{\omega R}{c} N_c^{\frac{1}{d}} t_0 \right) \right). \quad (23)$$

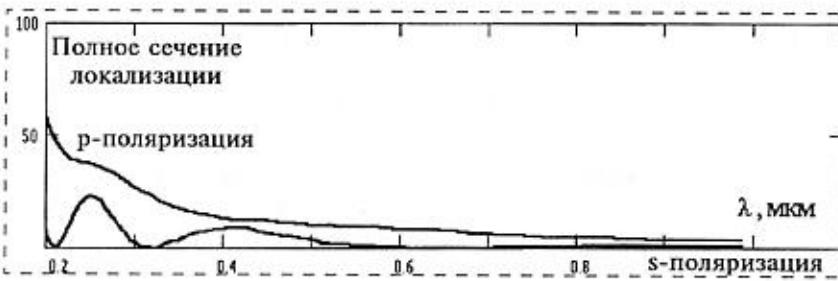


Рис. 5. Зависимость сечения локализации s - и p -поляризованного света от длины волны

Не меньшим сюрпризом выражения (15) для $d\sigma/dn_f$ является сингулярность рассеяния вперед. Имея в виду связь (19) между потоком рассеянного в направлении n_f излучения j_{n_f} и плотностью потока падающего излучения I , можно определить, что сингулярность в сечении означает, что в системе возможен конечный "ток" фотонов даже при нулевой плотности потока падающего излучения. Сингулярность $d\sigma/dn_f$ в направлении вперед описывает вынужденное излучение света из кластера. Это типично "лазерный" эффект. Когерентность вынужденного излучения обеспечивается "нульмерностью" локализованных антуановских фотонов и способностью к концентрации огромного их числа в малом объеме. Физическая причина когерентного сброса этих фотонов проста и наглядна. Любой фотон, рассеявшись "вбок", улавливается кластером и начинает осциллировать в нем вдоль направления рассеяния без права выхода из кластера. На его траектории образуются антуановские кольца, переплетенные с соответствующими кольцами локализованных фотонов. Именно это переплетение удерживает такой фотон в кластере. Больше всего таких колец у фотона, рассеивающегося на нулевой угол — мнимая часть $d\sigma/dn_f$ имеет максимум при $\theta = 0$ (см. выражение (15)). И в то же время только у такого фотона есть возможность вырваться из кластера, которая описывается действительной частью сечения. Этот фотон, зацепившись своими кольцами за соответствующие кольца локализованных фотонов, вытягивает их наружу (рис. 6, см. третью сторону обложки). Так на языке антуановских колец можно легко понять физику вынужденного излучения света.

Нетрудно видеть, что для создания микролазера на фрактальном кластере ничего больше не нужно. На рис. 7 (см. третью сторону обложки) представлена его принципиальная схема. Такой лазер может работать в любом диапазоне частот, где собственным поглощением частиц-мономеров кластера можно пренебречь. Кроме того, он обладает свойством, которого нет у обычного двухуровневого лазера. Спектр излучения, выходящего из фрактального лазера, может быть широким. Падающий фотон с частотой ω может вырывать из кластера локализованные фотоны с любыми частотами $\omega_1, \omega_2, \dots$, если предварительно их туда "накачать".

Еще раз возвращаясь к выражению (15), мы видим, что в фрактальной системе рассеивателей возможен режим полного исчезновения сопротивления всякому движению фотона вперед, связанного с рассеянием на частицах. Отсутствие затухания фотонного тока —

прямое следствие образования связанного состояния пары виртуальных фотонов: любой акт рассеяния фотона в сторону сопровождается, как мы видели, его запиранием в кластере и невозможностью уноса энергии на бесконечность. Можно видеть аналогию этого эффекта с явлением электронной сверхпроводимости. Существование конечного тока фотонов при нулевой плотности потока падающего на кластер излучения напоминает известную ситуацию в сверхпроводнике, где конечный ток электронов существует при полном отсутствии напряжения.

Теперь у нас появилась возможность ответить еще на ряд вопросов, поставленных в работе [4]. Особенностью антуановской локализации света является предпочтительная локализация света *p*-поляризации по сравнению с *s*-поляризацией (см. рис. 5). Объяснение этому следующее. Любой локализованный фотон (см. рис. 1) обладает моментом импульса, связанным с его эффективным "вращением" по петле между произвольным источником и детектором (возможно, поляризация фотона и обусловлена именно этим моментом импульса). Если рассеяние фотона сопровождается локализацией, то свет обязан изменить направление вектора поляризации. При рассеянии под любым ненулевым углом *p*-поляризованный фотон так и делает, а свет *s*-поляризации направление *e* не меняет никогда. Именно поэтому *p*-поляризованный фотон может локализоваться, а *s*-поляризованный — нет. Таким образом, *p*-поляризация света — необходимое условие для его локализации. Неслучайно особенности индикатрисы при рассеянии света в заднюю полусферу (рис. 5 работы [4]) присущи только свету этой поляризации; *s*-индикатриса, как мы видим, в основном "нормальная", за одним единственным исключением. При рассеянии в направлении вперед и назад понятие плоскости рассеяния не определено и разницы между *p*-поляризованным и *s*-поляризованным светом нет. Не должно быть никакой разницы и между рассеянием в этих направлениях. Именно это мы и видим на рис. 5 работы [4]. Результатом этого интересного эффекта является появление спицы и щели в индикатрисах рассеяния *s*- и *p*-поляризованного света соответственно.

3. Локализованный свет и проблемы квантовой телепортации

Совершенно неожиданное приложение идеи локализации света находят в так называемой проблеме квантовой телепортации — мгновенной передаче послания на произвольно большие расстояния. Эта экзотическая область исследований, начиная с работы [5], привлекает все большее и большее внимание физиков. Коротко напомним основные

положения "классической" теории квантовой телепортации.

Как известно, любую волновую функцию пары фотонов (фотон 2 и фотон 3), каждый из которых обладает двумя состояниями поляризации (горизонтальной поляризацией $| \leftrightarrow \rangle$ и вертикальной поляризацией $| \uparrow \downarrow \rangle$), можно разложить по четырем базисным состояниям (по так называемым состояниям Белла), которые образуют полную ортонормированную систему функций [6, 7]:

$$\begin{aligned} |\Phi^+\rangle &= (|\uparrow\downarrow\rangle_2|\uparrow\downarrow\rangle_3 + |\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_2|\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_3)/\sqrt{2}; \\ |\Phi^-\rangle &= (|\uparrow\downarrow\rangle_2|\uparrow\downarrow\rangle_3 - |\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_2|\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_3)/\sqrt{2}; \\ |\Psi^+\rangle &= (|\uparrow\downarrow\rangle_2|\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_3 + |\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_2|\uparrow\downarrow\rangle_3)/\sqrt{2}; \\ |\Psi^-\rangle &= (|\uparrow\downarrow\rangle_2|\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_3 - |\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_2|\uparrow\downarrow\rangle_3)/\sqrt{2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Состояние $|\Psi^-\rangle$ (в дальнейшем оно нас будет интересовать больше, чем остальные) обладает интересным свойством: при обнаружении одного из фотонов с определенной поляризацией поляризация другого оказывается противоположной.

Возможность экспериментально отличить одно из белловских состояний от других обеспечивается их различными симметриями. Из четырех состояний (24) первые три являются бозонными состояниями (их волновая функция не меняет знак при перестановке частиц 2 и 3). Последнее состояние $|\Psi^-\rangle$ — фермионное (при перестановке 2 и 3 знак волновой функции изменяется). Эта особенность состояния $|\Psi^-\rangle$ позволяет выделить его в ряде хорошо описанных в литературе экспериментов, использующих интерференцию двух специальным образом приготовленных световых пучков [5—7].

Имея в виду возможность работать далее с состоянием $|\Psi^-\rangle$, в дальнейшем будем использовать ставшую уже классической следующую экспериментальную схему [5—7]. Есть два участника игры — Алиса и Боб, и источник пары фотонов, описываемых состоянием $|\Psi^-\rangle$. Задача Алисы — передать имеющийся у нее фотон 1 Бобу, находящемуся как угодно далеко от нее. Однако Алиса не пользуется обычным классическим способом, а поступает следующим образом. Алиса и Боб одновременно получают пару фотонов 2 и 3, описываемую состоянием $|\Psi^-\rangle_{23}$. Алиса получает фотон 2, а Боб — фотон 3. Алиса "смешивает" фотон 1 и 2. При этом в одном случае из четырех она имеет возможность наблюдать состояние

$$|\Psi^-\rangle_{12} = (|\uparrow\downarrow\rangle_1|\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_2 - |\leftrightarrow\leftrightarrow\rangle_1|\uparrow\downarrow\rangle_2)/\sqrt{2}.$$

Как только она это обнаружит, немедленно фотон 3 переходит в начальное состояние фотона 1. Причина этого следующая. Наблюдение Алисой состояния $|\Psi^-\rangle_{12}$ означает, что при каком-то со-

стоянии фотона 1 фотон 2 будет в противоположном по поляризации состоянии. Но поскольку фотоны 2 и 3 находятся также в состоянии $|\Psi^-\rangle_{23}$, фотон 3 будет в состоянии, ортогональном состоянию 2, т. е. в состоянии фотона 1. Таким образом, происходит телепортация фотона 1 от Алисы к Бобу независимо от расстояния между ними. Телепортация осуществляется мгновенно.

Правда, при такой телепортации поляризационное состояние телепортируемого фотона 1 Алисе неизвестно, так как фотон 1 смешивается с фотоном 2, образуя состояние $|\Psi^-\rangle_{12}$.

Описанная процедура телепортации безупречна с точки зрения формализма квантовой механики. Однако физический смысл базисных состояний Белла остается неясным, так же как и нет полной ясности в разрешении парадокса Эйнштейна—Подольского—Розена (ЭПР-парадокс) [8], для описания которого эти состояния, собственно, и были введены. Как понять, что при измерении поляризации \leftrightarrow одного из фотонов, находящихся, например, в состоянии $|\Psi^-\rangle$, поляризация другого мгновенно оказывается \downarrow , несмотря на то, что их разделяет очень большое расстояние и любая информация относительно состояния второго сможет поступить к нам спустя вполне определенный интервал времени.

Пары фотонов, описываемые состояниями (24) или их линейными комбинациями, называют обычно ЭПР-фотонами или перепутанными фотонами. До тех пор, пока мы не поймем физическую причину мгновенных корреляций в свойствах этих фотонов, мы не поймем физику телепортации, несмотря на всю безупречность логических построений.

Как это не удивительно, но к проблемам ЭПР-парадокса и телепортации можно подойти с другой стороны — с позиций существования локализованного света. Один из вариантов ЭПР-парадокса следующий. Рассматривается, к примеру, s -рассечение фотона сферической частицей, т. е. рассеянная волна сферически изотропна (рис. 8, см. третью сторону обложки). Пусть рассеянный фотон подходит к детектору в точке A (Алиса). Этот акт регистрации позволяет нам сделать вывод, что в тот же самый момент времени этот рассеянный фотон достигает детектора, расположенного, к примеру, в точке B (Боб), отстоящей от A на сколь угодно большое расстояние. Это при том, что любая информация из B в A может быть передана по истечении только вполне определенного интервала времени. Если не рассматривать возможность сверхсветовой скорости распространения сигналов, понять ситуацию можно следующим образом. Что если регистрируемый акт прихода света в A связан вовсе не с рассеянным фотоном, а со сбитым из "трубки" AB локализованным "длинным" фотоном? Мы "ловим" его левый "конец". Тогда в

том, что в тот же самый момент времени происходит "регистрация" в точке B его "правого" конца, нет ничего странного. Никакого сверхсветового распространения сигнала не происходит, как не происходит и распространения сигнала вообще. "Длинный" локализованный фотон вытаскивается из "полости" за счет зацепления жестких антуановских колец локализованного и рассеивающегося фотонов. Это зацепление аналогично зацеплению, рассмотренному в фрактальном кластере.

Предположим теперь, что никакого фотона, рассеивающегося на частице, нет. А есть "полость" между Алисой и Бобом, заполненная локализованным в ней фотоном. Алиса посылает в эту полость свой фотон, который по известному нам механизму зацепляет локализованный фотон и "выпихивает" его Бобу. Таким образом, в результате действий Алисы Боб немедленно получает некоторую информацию, правда неизвестно какую, поскольку многие свойства локализованного фотона никому неизвестны.

Как мы видим, в данном случае для мгновенной "передачи" сигнала вместо пары ЭПР-коррелированных фотонов достаточно иметь дело с одним единственным локализованным фотоном. Впрочем, при желании его можно рассматривать как пару взаимодействующих между собой виртуальных фотонов — фотона верхнего берега и фотона нижнего берега (рис. 1 и 2). Кроме того, в [5–6] ЭПР-пара телепортировала Бобу неизвестный фотон Алисы. В нашем случае фотон Алисы, воздействовав на левый конец никому неизвестного локализованного фотона, "выпихивает" его правый конец Бобу. В этом вся разница и сходство двух механизмов телепортации.

Противоречит ли телепортация основам специальной теории относительности, утверждающей, что скорость передачи информации не может превосходить скорости света? Очевидно нет. В случае телепортации беннетовского типа [5] мгновенно передается никому не известный сигнал. У нас вообще ничего не передается. Боб получает то, что уже находится рядом с ним, но до поры до времени ему недоступно. Алиса мгновенно "разрешает" ему это сделать.

Заключение

Как мы видим, свет, локализованный во фрактальном кластере (ФК), имеет много практических приложений. Нам бы хотелось остановиться еще на одном, анонсированном в [4].

Внутри ФК, состоящего из слабопоглощающих наночастиц, способно локализоваться электромагнитное излучение с любой длиной волны λ , не превышающей характерного размера кластера L , или с любой частотой ω выше критической $\omega_c = 2\pi c/L$. Длина волны λ_{int} перенормированного локализо-

ванного фотона при любой частоте ω из этого диапазона — "нулевая" ($\lambda_{int} \rightarrow 0$). Это не должно удивлять — эффективная скорость у локализованного фотона также стремится к нулю в соответствии с соотношением $\lambda_{int} = 2\pi v/\omega$ (мы привыкли, что нулевая длина волны соответствует бесконечной частоте: $\lambda = 2\pi c/\omega$, где c — скорость света. Это справедливо для реальных фотонов, но не для виртуальных или локализованных).

Итак, если отвлечься от собственного поглощения наночастиц, хороший ФК улавливает и хранит в себе излучение с $\omega > \omega_c$ в течение макроскопического интервала времени. Причина улавливания и удержания — локализация, связанная с зацеплением "жестких" антуановских колец локализованного фотона. В то же время эти локализованные фотоны можно "извлечь" из кластера с помощью воздействия внешнего света, инициируя процесс вынужденного излучения локализованного света (знакомое нам зацепление антуановских колец внешнего света и локализованного в кластере). Вся эта "механика" рассмотрена нами в п. 2. Ничто не мешает "записать" в ФК спектр (зависимость интенсивности сигнала от частоты или времени) любого интересующего нас объекта (кристалла, биологической системы, динамического процесса и т. д.), если этот спектр укладывается в характерный для данного ФК частотный диапазон. Данный спектр хранится в течение длительного времени, а затем считывается с помощью внешнего света. Идея проста и привлекательна. В принципе, возможно изменять характеристики записанного спектра, воздействуя на него излучением нужных нам частот или меняя структуру кластера, напри-

мер его фрактальную размерность. Не исключено, что подобного рода спектр или "образ" объекта записывается с помощью, например, глаза и хранится в человеческом мозгу. Неслучайно нейронная сеть мозга имеет фрактальную структуру. Если немного пофантазировать, то можно представить возможность взаимодействия локализованных образов посредством, предположим, все того же вынужденного излучения, рассмотренного в п. 2. Не исключена возможность взаимной трансформации записанных образов, от которой уже недалеко до построения цепочки образов, формирования цепи рассуждений, процесса мышления и т. д.

Список литературы

1. Лушников А. А., Максименко В. В. Квантовая оптика металлической частицы // ЖЭТФ. 1993. Т. 103. С. 1010–1044.
2. Максименко В. В., Крикунов В. А., Лушников А. А. Сильная локализация света в плотноупакованной гранулированной среде // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. С. 1571–1586.
3. Максименко В. В., Галлямов Б. Ш., Мальцев П. П. Фрактальные кластеры и микросистемная техника. Локализация и остановка света в системе непоглощающих наночастиц // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 29–35.
4. Максименко В. В., Галлямов Б. Ш., Мальцев П. П. Фрактальные кластеры и микросистемная техника. Диэлектрическая проницаемость фрактального кластера // Микросистемная техника. 2001. № 8. С. 25–30.
5. Bennet C. H., Brassard G., Crepeau C. et al. Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels, Phys. Rev. Lett. 1993, V. 70. P. 1895.
6. Bouwmeester D., Pan J.-W., Mattle K. et al. Experimental Quantum Teleportation // Nature. 1997. 390. P. 575–579.
7. Кадомцев Б. Б. Динамика и информация. М.: Наука, 1999. 397 с.
8. Einstein A., Podolsky B., Rosen N., Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? // Phys. Rev. 1935. V. 47. P. 777.

10 июля 2001 г. в ИПМ РАН был проведен семинар

"Математическое моделирование процессов в нанотехнологиях и структурах"

Организаторы: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), Институт нанотехнологий Международного фонда конверсии, Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет).

С докладом "Состояние и перспективы развития работ в области микросистемной техники" выступил д-р техн. наук, проф. П. П. Мальцев (Секция прикладных проблем при Президиуме РАН).

В докладе был дан краткий исторический обзор возникновения и развития микросистемной техники как научно-технического направления. Проведен анализ зарубежных данных о современном состоянии исследований и разработок в этой области, в частности, даны основные характеристики объектов микросистемной техники, разрабатываемых в ведущих научных центрах мира и России. Было отмечено, что влияние микросистемной техники на научно-технический прогресс сопоставимо с влиянием микроэлектроники и вычислительной техники.

Применение МСТ

УДК: [579.087.9+543.95] + 543.86

**Ю. Н. Власов, д-р техн. наук, А. А. Мазничко, канд. техн. наук,
В. В. Зоря, А. Н. Решетилов, д-р хим. наук,
Институт биохимии и физиологии микроорганизмов
им. Г. К. Скрябина РАН, г. Пущино**

ПРИМЕНЕНИЕ БИОСЕНСОРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ХИМИЧЕСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Обычно практическое применение биосенсоров рассматривается преимущественно в гражданских областях — биотехнологии, пищевой промышленности, медицине, экологии. Ряд задач, относящихся к оповещению о биологической и химической опасности в условиях войсковой обстановки, также может быть решен с использованием биосенсорного анализа. В статье затронуты некоторые вопросы использования биосенсорных методов обнаружения биологически активных соединений войскового применения, в том числе детекция патогенных микроорганизмов.

Биосенсоры и аналитические процедуры на их основе уже давно вышли за рамки лабораторных исследований и заняли устойчивую нишу в повседневной практике. Биотехнология, пищевая промышленность, медицина, экология — далеко не полный перечень возможных областей их применения в гражданских целях. Ряд причин приводит к растущему интересу военных и силовых ведомств многих стран к практическому использованию биосенсорной аналитики в целях национальной безопасности, поскольку учащаются террористические акты с применением отравляющих веществ (ОВ) и не исключена возможность применения террористами биологического оружия (БО) [1]. Угроза применения химического и биологического оружия приводит к необходимости создания методов и приборов для выполнения не только быстрого и высокочувствительного обнаружения поражающих воздействий, но и предупреждающе-

го контроля. Использование биосенсоров для создания систем высокочувствительной и селективной детекции ОВ и БО и предотвращения последствий их применения относится к перспективным направлениям в разработке мер воинской химической и биологической защиты.

Рассматривая вопрос о возможном практическом применении биосенсоров в воинской практике отметим, что в данной работе в соответствии с классической терминологией под "биосенсором" подразумевается компактное устройство/прибор, содержащий анализирующий элемент биологической природы (биорецептор), работа которого может быть основана на использовании ферментов, клеток, антител, клеточных рецепторов и т. д. и который сопряжен с физическим преобразователем, проводящим регистрацию сигналов биологического элемента.

Потенциально биосенсоры способны выполнять чувствительную

и специфическую детекцию вредных воздействий, что обуславливает в целом перспективность развития данного направления. Анализ различных методов детекции, параметров и типов описанных биосенсоров и возможности их использования в войсковой практике приведены в обзоре [2].

Целесообразность использования в войсковой практике биосенсорных датчиков обусловлена следующими соображениями:

- имеется возможность разрабатывать системы для раннего предупреждения о применении химического или биологического оружия;
- биосенсоры для обнаружения биологического и химического оружия могут быть основаны на ферментах, антителах и тканевом материале, что позволяет имитировать сложные функции многоклеточных человеческих органов и с высокой чувствительностью оценивать поражающее действие;
- к достоинствам биосенсорного анализа относится возможность выявления не только известных, но и не использовавшихся ранее веществ;
- биосенсоры позволяют отличать физиологически активные вещества от неактивных химических соединений;
- малогабаритность и компактность анализаторов.

Характеризуя биосенсор как анализирующую систему, кратко отметим основные функции биоматериала. Биологический материал может быть сопряжен с преобразователями различных типов, которые обеспечивают наиболее эффективную регистрацию сигналов при взаимодействии с анализируемым соединением.

В биосенсорах электрохимического типа в сочетании с потенциометрическими электродами

применяют ферменты, рецепторы, клетки микроорганизмов, ткани растений и животных, антитела, меченные ферментами. В сочетании с амперометрическими электродами известно использование ферментов, микроорганизмов, тканей растений и животных, антител, меченных ферментами.

В биосенсорах кондуктометрического типа описано использование ферментов, искусственных бислойных липидных мембран.

Оптические типы биосенсоров основаны на измерении флюoresценции, люминесценции, эффектов поверхностного плазмонного резонанса, затухающих волн.

В биосенсорах на основе акустических преобразователей известно применение антител, антигенов, ферментов, нуклеиновых кислот.

Измерение количества теплоты, выделяемой при взаимодействии анализируемого соединения с материалом биорецептора, используется в биосенсорах калориметрического типа; основой биорецептора могут служить ферменты, клетки микроорганизмов, животных. Для дальнейшего знакомства с биосенсорами различных типов можно обратиться к монографиям [3—5].

Биорецептор сенсора выполняет селективное распознавание анализируемого соединения, и кроме того, отвечает за возникновение сигнала физико-химической природы, который регистрируется преобразователем. Биорецепторы можно разделить на две категории: каталитические и аффинные. Группа каталитических биорецепторов включает ферменты, ткани, клетки микроорганизмов. Сенсоры, основанные на этих компонентах, позволяют проводить анализ в непрерывном режиме; типичный диапазон измеряемых концентраций заключен в пределах от микро- до миллимоляр. К группе некаталитических (аффинных) относятся биосенсоры на основе антител/антигенов, лектинов, клеточных рецепторов, нуклеиновых кислот, ко-

торые в большинстве случаев предназначены для одноразового использования при детекции гормонов, стероидов, лекарственных веществ в концентрациях от пико- до микромолей.

Ферменты. Стабильность фермента является, как правило, решающим фактором, определяющим время жизни сенсора; продолжительность непрерывного функционирования может составлять от одного дня до одного или двух месяцев.

Органеллы. Митохондрии, хлоропласты, целые клетки — бактерии, микроскопические грибы, а также срезы тканей растительного или животного происхождения используют в сенсорах как структуры, содержащие наборы ферментов. Основной недостаток биосенсоров этого типа — низкая селективность.

Клеточные рецепторы. Рецепторы животных клеток относятся к белкам, локализованным в мембранах и не обладающим каталитической активностью. Связывание анализируемого соединения с иммобилизованными рецепторами может быть измерено непосредственно пьезоэлектрическим преобразователем по изменению массы биоэлемента либо с помощью оптической техники на установках по измерению поверхностного плазмонного резонанса.

Антитела (Ат) и антигены (Аг). Образование комплекса Аг с Ат преобразователем биосенсора может быть измерено непосредственно или косвенно. Непосредственно можно зарегистрировать изменения массы с помощью акустического преобразователя, а также изменение угла отражения методом поверхностного плазмонного резонанса. Связывание также может быть зарегистрировано техникой, основанной на использовании оптических методов, в случае, если Аг или Ат коньюгирано с флюоресцентной меткой; в биосенсорах электрохимического типа для проявления комплекса антиген/антитело применяют ферментную метку.

Два последних типа биосенсоров относятся к классу иммуносенсоров с косвенной детекцией.

Нуклеиновые кислоты. Последнее десятилетие отмечено интенсивным развитием методов электрохимической, микрографиметрической и оптической детекции реакций гибридизации ДНК, а также использования ДНК как мишени воздействия [6]. В ряде работ было показано, что электрохимические методы не обладают высокой чувствительностью и помехоустойчивостью, поэтому наиболее приемлемыми оказались акустический и оптический методы [7].

Биосенсоры для обнаружения химических и биологических факторов

Расширенный список материалов, которые рассматриваются как токсичные и относятся к потенциальным препаратам для применения в качестве ОВ и БО приведен в [8] (цитирование по [2]). Биосенсоры, предназначенные для детекции токсичных материалов, условно можно разделить на три группы: для обнаружения токсичных химикатов, токсинов, микроорганизмов.

В список химических соединений, для которых в настоящее время разработаны методы биосенсорной детекции, входят паратион, малатион, этилпаратион, длизопропилфторфосфат, зоман, параоксон, фосфорорганические соединения типа диметил-метилфосфоната, используемые как модели боевых нервно-паралитических ОВ, цианид; описаны биосенсоры для детекции таких токсинов как α -бунгаротоксин, токсин яда гремучих змей (*mojave toxin*), охратоксин (микотоксин *Aspergillus ochraceus*), ботулинический токсин тип А, энтеротоксин стафилококка, рицин [2].

К поражающим агентам биологического оружия относятся живые организмы, включая вирусы или инфекционный материал, полученный от них и вызывающий болезни, гибель людей, жи-

вотных, растений. Патогенные бактерии синтезируют и выделяют во внешнюю среду экзотоксины, являющиеся причиной патологических состояний. Примерами таких ядов, которые отравляют или убивают клетки млекопитающих, являются токсин *Shigella dysenteriae*, энтеротоксин золотистого стафиллококка, столбнячный токсин, ботулинический токсин, а также токсины, продуцируемые бактериями *Bacillus anthracis* и *Corynebacterium diphtheriae*. Другие патогенные бактерии (*Salmonella* и *Brucella*) выделяют токсины при лизисе; эти токсины являются компонентами клеточной стенки, представляют собой коньюгаты белков, липидов и углеводов и носят название эндотоксинов.

Некоторые грибы патогенны для человека в связи с тем, что могут проникать и размножаться в тканях; в этом случае повреждающий эффект не связан с выделением токсинов. Другие грибы (в основном *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus*), являющиеся контаминантами продуктов и кормов, представляют серьезную опасность в связи с их способностью синтезировать крайне токсич-

ные соединения — микотоксины. К ним в первую очередь следует отнести афлатоксины, охратоксины, трихотеценовые соединения, патулин, эргоалкалоиды и ряд других [9].

Биосенсоры для детекции микроорганизмов. Как правило, все микроорганизмы являются иммуногенами. В этой связи для их детекции существуют или могут быть созданы методы анализа, основанные на стандартных подходах иммуноферментного анализа и адаптированные к биосенсорной технике измерения. Некоторые микроорганизмы, обнаруживаемые с помощью биосенсорных методов, представлены в таблице; далее следует их краткий анализ.

В работе [10] описана возможность использования СПС-преобразователя (светоадресуемого потенциометрического сенсора) для детекции бактериальных антигенов в целом. Процедуру разрабатывали для обнаружения патогенных бактерий *Neisseria meningitidis* и *Yersinia pestis*. Показана высокая чувствительность созданной системы — метод позволял детектировать наличие в пробе 1000 бактериальных клеток,

время анализа составляло 20 мин, в то время как стандартный метод иммуноферментного анализа позволяет обнаруживать только 60 000 клеток за время 2,5 ч. СПС являлся также основой биосенсоров для детекции бактерий *Brucella militensis* [11], *Francisella tularensis* [12], *Coxiella burnetti* [13] и вируса Ньюкасловой лихорадки (NDV) [11, 14]. Для бактерий *Brucella* нижний предел детекции составлял 6 нг (6 000 клеток), для NDV 1,3 — 40 нг. Метод, предложенный Томпсон и Ли [15], позволял обнаруживать 3400 клеток (около 4 нг) при времени инкубации 1 ч.

Определение концентрации клеток *Clostridium thermocellum* представлено в работе [6]; авторы использовали поликлональные антитела к *C. thermocellum*. Надежную регистрацию обеспечивал метод предварительной сорбции клеток на активированную поверхность полимерной мембранны и дальнейшее проявление клеток антителами и белком А, коньюгированным с пероксидазой хрена; минимальная детектируемая концентрация клеток составляла

Микроорганизмы, обнаруживаемые с помощью биосенсорных методов

Тип микроорганизмов	Тип биосенсора, преобразователя	Предел детекции	Среда	Время анализа	Литература
<i>Nesseria meningitidis</i>	LAPS (антиген/антитела, ПХ)	<1000 клеток	Водная среда	20 мин	[10]
<i>Yersinia pestis</i>		<1000 клеток		30 мин	
<i>Yersinia pestis</i>	Акустический преобразователь, антитела	10^6 клеток	Водная среда	45 мин	[22]
<i>Shigella dysenteriae</i>		10^6 клеток			
<i>Yersinia pestis</i>	Оптические волокна, флуоресцентная метка	5 нг/мл	Водная среда	30 мин	[18]
<i>Brucella militensis</i>	LAPS, антитела, уреаза	6000 клеток	Водная среда	—	[11, 14]
<i>Newcastle disease virus</i>	Оптическое волокно, затухающая волна	5 нг	Водная среда	15 мин	[14]
<i>Francisella tularensis</i>	LAPS, антитела, уреаза	3,8 нг (5100 клеток)	Водная среда	65 мин	[15]
<i>Salmonella typhimurium</i>	Акустические антитела	10^5 клеток/мл	Водная среда	5 ч	[21]
<i>Salmonella typhimurium</i>	Акустический (ДНК)	1 мг/мл	Водная среда	—	[28]
<i>Salmonella typhimurium</i>	Оптические, люминесценция, антитела	10^5 клеток/мл	Водная среда	30 мин	[20]
<i>Bacillus anthracis</i> (споры)	Оптический (затухающая волна)	$3 \cdot 10^3$ клеток/мл	Водная среда	35 с	[19]

Обозначения: LAPS — светоадресуемый потенциометрический сенсор, ПХ — пероксидаза хрена.

10^4 клеток/мл, максимальная исследованная — 10^7 клеток/мл.

Исследования по иммунодетекции интенсивно ведутся для преобразователей оптического и пьезоэлектрического типов. Описана оптическая система на основе поликлональных антител для детекции вируса NDV, в которой использован принцип регистрации затухающих волн [17]. В работе [18] использовали флюороиммunoсенсор для детекции *Yersinia pestis*; метод позволял обнаруживать 5 мг/мл бактерий за время 30 мин. Приближенная оценка концентрации, превышающей 50 мг/мл, могла быть получена за 15 мин. Применяя такую же схему детекции, в работе [19] показали, что используя антитела к защитному белку (РА), выделяемому бактериями одновременно с сибиреязвенными токсинами, можно эффективно применять сенсор в медицинских диагностических целях с нижним пределом детекции для РА 10 нг/мл. Оптический иммunoсенсор с ферментной меткой (пероксидаза хрена), генерирующей хемилюминесцентный сигнал, для детекции *Salmonella typhimurium* приведен в [20]; нижний предел детекции составлял 10^5 клеток/мл.

Биосенсор на основе пьезоэлектрического кристалла использовали для детекции *Salmonella typhimurium* [21]. Исследованный диапазон концентраций клеток составлял 10^5 — 10^9 клеток/мл. Время измерения зависело от концентраций клеток; при концентрации 10^5 клеток/мл для измерения требовалось 5 ч. Аналогичное устройство применили для обнаружения *Yersinia pestis* и *Shigella dysenteriae* [22]; линейную зависимость сигнала наблюдали для диапазона 10^6 — 10^8 клеток. Сенсор позволял выполнить 12 анализов без заметной потери чувствительности в течение 6 недель при хранении в сухом состоянии. Теоретические аспекты применения стандартной сэндвич-схемы иммуноферментного

анализа с последующей проверкой результатов на экспериментальных моделях детекции бактериальных клеток рассмотрены в работе [23].

Кроме описанных выше методов иммунодетекции микроорганизмов перспективным направлением является разработка биосенсорных методов обнаружения микроорганизмов на основе регистрации их оксидоредуктазной и дегидрогеназной активности. Рецепторным элементом биосенсора в этом случае будет являться носитель, содержащий собранные из окружающей среды микроорганизмы; предполагается, что преобладание в пробе какого-либо определенного вида (штамма) может быть идентифицировано по характерному "портрету" субстратной специфичности, представляющему соотношение значений активностей каталитических систем клеток при окислении различных тестовых субстратов [24—26].

Принципиально новым подходом в детекции и идентификации микроорганизмов является разработка ДНК-биосенсоров. Анализ, основанный на гибридизации нуклеиновых кислот, представляет альтернативную иммуноанализу процедуру обнаружения; сопряженный с тиражированием искомого материала с помощью полимеразной цепной реакции (ПЦР), он обеспечивает наивысший уровень чувствительности [27]. В соответствии с этим принципом описан микрографиметрический сенсор, который применили для детекции *Salmonella typhimurium* с помощью ДНК-зонда, иммобилизованного на поверхности кварцевого кристалла [28]. Перспективность детекции микроорганизмов с помощью ДНК-сенсора была показана также для преобразователей оптического и электрохимического типов. Так, процесс гибридизации олигонуклеотидов регистрировали оптическим путем, используя метод поверхностного плазмонного ре-

зонанса [29], а также метод регистрации затухающих волн [30]. В последнем случае сенсор позволял обнаруживать 1 мг олигонуклеотида, содержащего 20 оснований за время 60 с. Авторы показали, что рецептор можно регенерировать, подогревая его до 363 К, поэтому зонд позволял проводить измерения многократно.

Описан прототип биосенсора, позволяющий определять специфические последовательности ДНК и основанный на измерении значений пикового тока, генерируемого индикаторами гибридизации [31]. Сенсор позволял выполнить до 10 циклов регенерации. Разработан метод для измерения общего содержания ДНК микробных клеток [32]; для этого меченный биотином белок *E. coli*, связывающий однокцепочечную ДНК и антитела к ДНК, конъюгированные с уреазой, инкубировали в присутствии стрептавидина с образцами ДНК, подвергнутыми тепловой обработке. Активность уреазы измеряли с помощью СПС. Сигналы сенсора были пропорциональны концентрации ДНК в диапазоне 2—200 пикограмм (пг). Общее время анализа не превышало 2 ч при нижнем пределе детекции 2 пг.

* * *

Значительная часть собранных к настоящему времени данных не говорит о возможности сиюминутного использования ферментов, рецепторов или иммуноактивных компонентов в биосенсорах для непрерывного мониторинга токсичных материалов. В первую очередь это связано с относительно низкой стабильностью биологического материала, необратимостью процесса связывания анализируемого соединения с рецепторным элементом сенсора и необходимостью вносить новые порции субстратных смесей в случае регистрации, производимой сенсорами типа СПС или оптическими. Кроме того, с точки зрения оперативно-

сти оценок, необходимой для анализа в полевых условиях, оценка поражающих агентов с помощью иммуно- и ДНК-сенсоров и процедура детекции являются слишком длительными. Вместе с тем, несмотря на перечисленные проблемы, биосенсоры представляют собой высокоеффективный инструмент анализа и позволяют выполнять высокочувствительную детекцию "на месте" поражающих агентов химической и биологической природы. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят расширить возможности данного типа анализаторов и приблизиться к созданию непрерывно действующих, необслуживаемых систем анализа.

Список литературы

1. Золотов Ю. А. Химическое оружие: аналитический аспект // Журнал аналитической химии, 1998, т. 53, № 6. С. 565.
2. Paddle B. M. Biosensors for chemical and biological agents of defense interest // Review article. Резюме. Biosensors and Bioelectronics, 1996, v. 11, № 11. P. 1079–1113.
3. Gabor Harsanyi. Sensors in Biomedical Applications: Fundamentals: Technology & Applications. Technomic Publishing Company, 2000. 576 p.
4. Donald G. Buerk. Biosensors: Theory and Applications. Technomic Publishing Company, 1993. 673 p.
5. Тернер Э., Карубе И. Биосенсоры: основы и приложения. М.: Мир, 1992. 770 с.
6. Евдокимов Ю. М. Биосенсоры на основе одно- и двухцепочных линейных молекул ДНК // Сенсорные системы. 1998, т. 12, № 1. С. 5–21.
7. Евдокимов Ю. М., Скуридин С. Г., Салинов В. И., Рыбин В. К. и др. Принципы создания биодатчиков на основе жилых кристаллов нуклеиновых кислот // Биофизика. 1990, т. 39, № 5. С. 731–738.
8. Gessler E. (ed.) Biological and Toxin Weapons Today. Oxford University Press for SIPRI, 1986.
9. Тутельян В. А., Кравченко Л. Г. Микотоксины. М.: Медицина, 1985. 420 с.
10. Libby J. M., Wada H. G. Detection of *Nesseria meningitidis* and *Yersinia pestis* with a novel silicon-based sensor // J. Clin. Microbiol. 1989, № 27. P. 1456–1459.
11. Lee W. E., Jacobson T. V. & Thompson H. G. Characteristics of the biochemical detector sensor // Defence Research Establishment Suffield, Canada. Suffield Memorandum, 1993, № 1402. P. 1–23.
12. Lee W. E. & Hall L. G. et al. Biosensor based detection of soman // Defence Research Establishment Suffield, Canada Suffield Memorandum 1992, № 1380. P. 1–14.
13. Menking D. G., Goode M. T. Evaluation of cocktail antibodies for toxin and pathogen assays on the light addressable potentiometric sensor // In: ERDEC Scientific Conference on Chemical Defense Research, 17–20 November Proc. 1992 ERDEC Scientific Conference on Chemical Defense Research, 17–20 November, J. D. Williams, D. A. Berg & Reeves (eds.) Report No. ERDES-SP-007, June 1993. P. 103–109.
14. Lee W. E., Thompson H. G., Hall J. G. Rapid immunofiltration assay of Newcastle Disease Virus using a silicon sensor // J. Immunol. Meth., 1993, № 166. P. 123–131.
15. Thompson H. G., Lee W. E. Rapid immunofiltration assay of *Francisella tularensis* // Defence Research Establishment Suffield, Canada. Suffield Memorandum. 1992, № 1376. P. 1–17.
16. Akimenko V. K., Khomutov S. M., Obraztsova A. Ya., Reshetilov A. N. et al. A Rapid Method for Detection of *Clostridium thermocellum* by field-effect transistor-based immunodetection // J. Microbiological Methods. 1996. v. 24. P. 203–209.
17. Lee W. E., Thompson H. G. Fibre optic biosensor assay of Newcastle Disease Virus // Defense Research Establishment Suffield, Canada. Suffield Report. 1993, № 580. P. 1–36.
18. Cao K. L., Anderson G. P., Ligler F. S. & Ezell J. Detection of *Yersinia pestis* Fraction I antigen with a fiber optic biosensor // J. Clin. Microbiol., 1995, № 33. P. 336–341.
19. Wijesuriya D., Anderson G. P. & Ligler F. S. A rapid and sensitive immunoassay for bacteria cells // Proc. 1993 ERDEC Scientific Conference on Chemical Defense Research 16–19 November, Berg D. A., Williams J. D. Jr. & P. J. Reeves (eds.). Report No. ERDES-SP-024, August, 1994. P. 671–677.
20. Starodub N. F., Arenkov P. Y., Starodub A. N. & Berezin V. A. Construction and biomedical application of immunosensors based on fiber optics and enhanced chemiluminescence // Opt. Eng., 1994, № 33. P. 2958–2963.
21. Prusak-Sochaczewski E., Luong J. H. T. & Guilbault G. G. Development of a piezoelectric immunosensor for the detection of *Salmonella typhimurium* // Enzyme Microbial. Technol., 1990, № 12. P. 173–177.
22. Konig B. & Gratzel M. Detection of viruses and bacteria with piezoelectric immuno-
- nosensors // Anal. Lett., 1993, № 26. P. 1567–1585.
23. Карулин А. Ю., Дзантев Б. Б. Поливалентное взаимодействие антиген–антитело: теоретические модели и роль в иммуноанализе клеток // Журнал Всесоюзного химического общества им. Менделеева. 1989, т. 34, № 1. С. 30–38.
24. Луста К. А., Решетилов А. Н. Физиологи-биохимические особенности *Glucoronobacter oxydans* и перспективы использования в биотехнологии и биосенсорных системах // Прикладная биохимия и микробиология. 1998, т. 34, № 4. С. 339–353.
25. Ильясов П. В., Шмалько Т. А., Луста К. А., Решетилов А. Н. Сравнительная оценка свойств бактерий рода *Glucoronobacter* для биосенсорной детекции органических субстратов // Прикладная биохимия и микробиология. 1998, т. 34, № 5. С. 529–533.
26. Reshetilov A. N., Ilyasov P. V., Filonov A. E., Gayazov R. R. et al. *Pseudomonas putida* as a receptor element of microbiol sensor for naphthalene detection // Process Biochemistry. 1997, v. 32, № 6. P. 487–493.
27. Smith T. J., Dawson M. T. & Gannon F. The 16S23S ribosomal RNA spacer region as a target for DNA probes to identify potential biological warfare threats // Proc. 1993 ERDES ERDEC Scientific Conference on Chemical Defense Research 16–19 November, Berg D. A. Williams J. D., Jr. & P. J. Reeves (eds.). Report No. ERDES-SP-024, August, 1994. P. 603–608.
28. Downs M. E. A. Prospects for nucleic acid biosensors // Biochem. Soc. Trans., 1991 № 19 39–43. Enzyme Nomenclature 1978. (1979). Recommendations of the Nomenclature Committee of the International Union of Biochemistry. Academic Press, New York.
29. Pollard-Knight D., Hawkins E., Yeung D., Pashby D. P. et al. Immunoassays and nucleic acid detection with a biosensor based on surface plasmon resonance // Ann. Biol. Clin. 1990, № 48. P. 642–646.
30. Graham C. R., Leslie D. & Squirrell D. J. Gene probe assays on a fibre-optic evanescent wave biosensor // Biosensors & Bioelectronics. 1992, № 7. P. 487–493.
31. Millan K. M., Mikkelsen S. R. Sequence selective biosensor for DNA based on electroactive hybridization indicators // Anal. Chem., 1993, № 65. P. 2317–2323.
32. Kung V. T., Panfilo P. R., Sheldon E. L., King R. S. et al. Picogram quantitation of total DNA using DNA-binding proteins in a silicon sensor-based system // Anal. Biochem., 1990, № 187. P. 220–227.

УДК 621.397.6:004.3.02.021

В. В. Белавин, А. В. Буданцев, А. В. Гусаченко

Конструкторско-технологический институт прикладной
микроэлектроники СО РАН, г. Новосибирск

ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ ВРАЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ

Рассматриваются вопросы проектирования быстродействующего электронного устройства поворота телевизионного изображения. Приводятся основные требования к выбору элементной базы, а также прогнозируемые параметры устройства.

Устройства компенсации вращения изображения предназначены для облегчения решения задачи распознавания и сопровождения объектов и могут использоваться в бортовых телевизионных системах сопровождения целей. Они также могут применяться в составе оптико-электронных датчиков с динамическим способом формирования поля изображения [1].

Основные отечественные системы компенсации вращения изображения, находящиеся в настоящее время в эксплуатации, базируются на оптико-механическом способе компенсации. Однако они не в состоянии удовлетворить современные требования к массогабаритным параметрам и степени унификации устройств. Ниже рассматривается устройство на основании концепции, изложенной в [2], согласно которой оптимальным путем построения устройств компенсации вращения изображения является аппаратная реализация преобразования координат элементов (пикселей) дискретизированного исходного изображения (растра) с помощью специализированного вычислительного устройства, реализующего рекуррентный алгоритм вычисления координат пикселей преобразованного растра. Как пока-

зано в [2], для достижения минимального времени задержки преобразованного изображения разложение исходного изображения в растр должно быть прогрессивным. При этом на вычислительное устройство приходится минимальная нагрузка при наименьшей задержке между кадрами исходного и преобразованного изображений и достаточно высоком качестве преобразованного изображения.

Структурная схема бортового комплекса с использованием электронного способа компенсации вращения изображения показана на рис. 1, где собственно устройство компенсации вращения выделено штриховой рамкой. Бортовая ЭВМ носителя вычисля-

ет необходимый угол поворота растра и передает его значение в устройство компенсации вращения изображения. На выходе устройства должен быть стандартный композитный телевизионный сигнал с чересстрочным расположением изображения и частотой полей 50 Гц (частота кадров 25 Гц). Формат раstra преобразованного изображения — 768 × 576 элементов (288 активных строк в поле).

Для обеспечения требуемой динамической погрешности по углу задержка между кадрами исходного и преобразованного изображений должна составлять не более 20 мс. При указанном формате раstra преобразованного изображения и с учетом возможной коррекции положения центра вращения из-за несовпадения оптической оси проекционной системы с центром ПЗС-матрицы, на которой формируется изображение, формат раstra исходного изображения, согласно [2], должен составлять не менее чем 1024 × 1024 элементов, участвующих в построении изображения (активных).

Время задержки между кадрами исходного и преобразованного изображений определяется суммарным временем получения изображения с матрицы. Оно, в свою очередь, складывается из следующих фаз: время интегрирования фототока, время переноса накопленного заряда из секции накопления в секцию хранения (только для двухсекционных приборов) и время считывания изображения из секции хранения.

Шины управления переносом заряда в ПЗС-матрицах имеют значительную емкость относительно подложки, поскольку они занимают значительную площадь кристалла. Это ограничивает максимальную частоту смены их потенциала относительно подложки, а следовательно, и



Рис. 1. Структурная схема системы компенсации вращения изображения

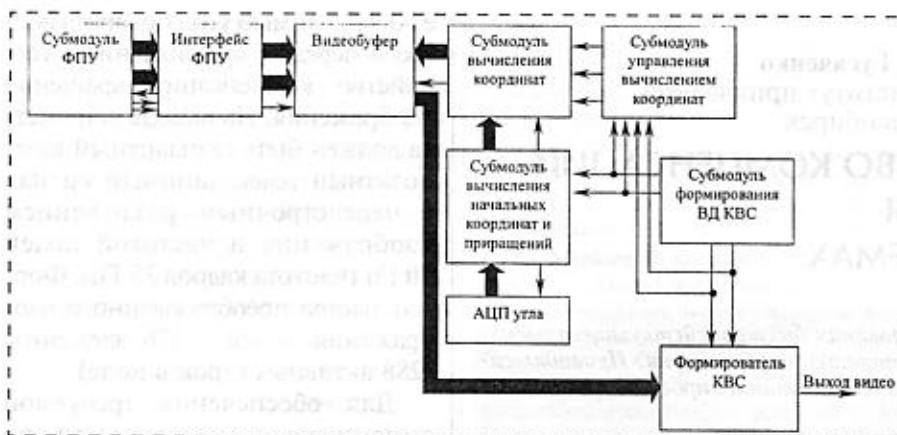


Рис. 2. Функциональная схема устройства

скорость переноса заряда. Кроме того, при увеличении скорости переноса заряда падает эффективность его переноса, при этом часть потерянного заряда стекает в подложку, а часть распределяется между соседними элементами вдоль линии переноса, что ведет к ухудшению частотно-контрастной характеристики прибора.

Близкими к предельным для высокоскоростных ПЗС-матриц высокого разрешения можно считать следующие параметры: часто-

та сигнала управления фазами горизонтального регистра считывания приблизительно 40 МГц (время считывания элемента 25 нс), время переноса заряда в вертикальном направлении около 1,25 мкс. Существуют приборы, позволяющие вести считывание изображения по двум каналам для двухсекционных приборов или по четырем — для односекционных. При указанных временных параметрах ПЗС-матрицы суммарная длительность циклов переноса

изображения в секцию хранения и считывания из нее по двум каналам составит 15304,5 мкс, а максимальная длительность цикла интегрирования фототока — 4695,5 мкс.

Функциональная схема устройства компенсации вращения телевизионного изображения приведена на рис. 2, а временная диаграмма его работы — на рис. 3. Запуск цикла интегрирования фототока в ПЗС-матрице осуществляется в начале отображения четного поля предыдущего кадра преобразованного изображения. При суммарной длительности циклов интегрирования фототока, переноса заряда в секцию хранения и считывания из нее изображения, равной 20 мс, кадр исходного изображения успевает записаться в выходной видеобуфер до начала отображения первого поля преобразованного изображения, соответствующего принятому кадру исходного. Задержка между моментами начала интегрирования кадра исходного изображения и начала вывода соответствующего ему кадра преобразованного изо-

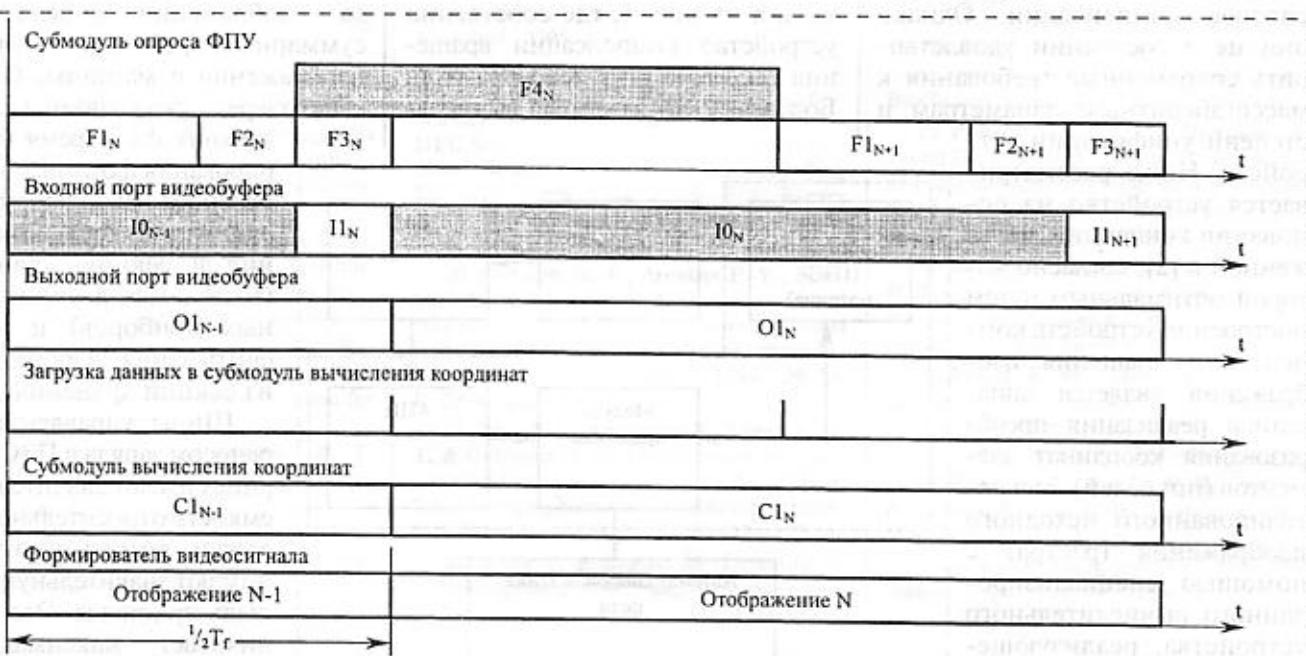


Рис. 3. Временная диаграмма работы устройства:

F1 — накопление; F2 — перенос в секцию хранения; F3 — передача в видеобуфер; F4 — сброс заряда; C1 — вычисление координат; C2 — состояние останова, IO — состояние останова; II — прием данных; O1 — выдача данных

брожения будет равной длительности поля, т. е. 20 мс.

С учетом столь высокой скорости считывания сигнала с ПЗС-матрицы часть устройства, расположенного со стороны входного порта видеобуфера, необходимо реализовать на наименьшем числе БИС, причем задержка распространения сигнала от тактового входа до управляющих и информационных выходов не должна превышать 7 нс. Этим требованиям удовлетворяет семейство программируемых логических устройств XC4000EX архитектуры FPGA производства фирмы *Xilinx* [3]. Часть устройства со стороны выходного порта видеобуфера также предполагается реализовать на микросхемах FPGA фирмы *Xilinx*, однако она может быть реализована и на базе отечественных цифровых микросхем БМК, так как быстродействие этой части устройства определяется скоростью выдачи элементов обработанного изображения, что составляет приблизительно 14,77 МГц.

Для применения в составе устройства была выбрана ПЗС-матрица FTT1010-M производства фирмы *Philips Semiconductors*, технические характеристики которой приведены в [4].

Субмодуль вычисления начальных координат и приращений (ВНКП) предполагается реализовать на процессоре цифро-

вой обработки сигнала (ЦОС). В качестве процессора ЦОС был выбран ADSP-21062 фирмы *Analog Devices Inc.* Возможно использование устройства другого производителя с близким быстродействием и составом периферийных устройств, например семейства TMS320C52xx/62xx.

Для достижения высокой степени совместимости между различными системами проектирования цифровой техники, а также для облегчения перехода на заказные БИС предполагается проект цифровой части устройства, за исключением субмодуля ВНКП, выполнить в виде модели смешанного типа на языке VHDL (Very high speed Hardware Descriptive Language), который является общепринятым стандартом при проектировании цифровой техники. Субмодули, соответствующие нижнему уровню, описываются в виде поведенческой модели. Само устройство представляется в виде структурной модели, объединяющей поведенческие модели составляющих его субмодулей.

Ожидаемые параметры быстродействия проектируемого устройства должны быть не хуже следующих:

- диапазон угла поворота . . . ± 180°;
- максимальная скорость изменения угла 90°/с;
- суммарная погрешность по углу не более ± 3°;
- статическая погрешность не более ± 1°.

На выходе устройства имеется стандартный композитный телевизионный сигнал с чересстрочным разложением изображения и частотой полей 50 Гц. Формат раstra — 768 × 576 элементов (два поля по 288 активных строк в каждом).

Поскольку при проектировании пришлось сократить время интегрирования фототока в ПЗС-матрице приблизительно в 2 раза по сравнению с номинальным, ожидается пропорциональное ухудшение соотношения сигнал/шум. Снижение отношения сигнал/шум ожидается пропорциональным, поскольку основной вклад в это отношение вносит шум считывания, интенсивность которого не зависит от времени интегрирования.

Список литературы

1. Демьянов Э. А., Доброльский П. П., Журавлев П. В. и др. Многоспектральные широкоугольные оптико-электронные датчики с динамическим способом формирования поля изображения // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 22—24.
2. Буданцев А. В., Гусаченко А. В., Журавлев П. В. Возможность использования электронного способа компенсации вращения изображения в бортовых телевизионных системах // Микросистемная техника. 2001. № 7. С. 25—28.
3. XC4000E and XC4000X Series Field Programmable Gate Arrays. Product specification (Version 1.6). © Xilinx, May 14, 1999.
4. FTT1010-M Frame Transfer CCD Image Sensor, Product specification © Philips Semiconductors, September 21, 1999.

Design, Test, Integration and Packaging of
MEMS/MOEMS
6—8 may 2002
France
Conference

CAD, Design and Test Chair: T. Mukherjee, USA Co-Chair: J.M. Karam, France	Microfabrication, Integration and Packaging Chair: B. Michel, Germany Co-Chair: J. Walker, USA
--	--

Including:
Workshop on MEMS/MOEMS business development: CEOs/analysis panel
and
Workshop on CAD needs for MEMS organized by NEXUS

Submission of abstracts: 1 November 2001 Notification of acceptance: 31 December 2001
--

Web site: <http://tima.imag.fr/Conferences/dtip2002>

Конструирование и моделирование МСТ

УДК 571.354:543.274

С. М. Репинский, д-р хим. наук,
Институт физики полупроводников СО РАН,
Новосибирск

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ¹

Часть первая

Закономерности рецепции газов рассматриваются как адсорбционно-десорбционный процесс, характеристики которого определяют основные параметры твердотельных химических газовых сенсоров, такие как чувствительность, порог обнаружения и быстродействие. Проблема технологии получения чувствительного слоя сенсора сводится к задаче создания организованных молекулярных ансамблей, содержащих необходимый набор рецепторных центров. Физико-химический подход демонстрируется на примерах интегрально-емкостного, поляризационно-оптического и микроакустического типов твердотельных газовых сенсоров SO_2 .

Разработки и исследования в области газовых сенсоров стимулируются потребностями контроля окружающей среды и среды жизнедеятельности человека. Эти исследования также необходимы для создания средств технологического контроля в химических, металлургических, газо-, угле- и нефтедобывающих производствах.

Основное преимущество химических твердотельных сенсоров в сравнении с такими инструментальными методами контроля, как хроматография, оптическая спектроскопия или масс-спектроскопия, заключается в их портативности. Это и позволяет решать задачи качественного и количественного анализа состава газовой фазы посредством устройств индивидуального контроля.

По принципу действия и технологии изготовления различают следующие типы сенсоров:

- электрохимические (потенциометрия и кулоно-метрия на твердых электролитах) [1, 2];
- каталитические или калориметрические (фиксация теплового эффекта гетерогенной реакции горения газа) [3–5];

- полупроводниковые (кондуктометрия оксидов металлов) [6, 7];
- микроэлектронные (диодные или транзисторные структуры, системы полупроводник—диэлектрик или металл—диэлектрик—металл) [8, 9];
- микроакустические;
- поляризационно-оптические (о которых речь пойдет впереди).

Электрохимические сенсоры измеряют изменение потенциала или проводимости чувствительного элемента на основе твердых электролитов в зависимости от концентрации активного компонента газа. Каталитические сенсоры фиксируют изменение температуры при экзотермической реакции окисления горючего газа или пара на поверхности катализатора. Полупроводниковые сенсоры построены обычно на основе металлоксидных систем, проводимость которых изменяется в зависимости от типа и концентрации газа. К микроэлектронным сенсорам относят структуры, содержащие полевой транзистор, емкостной или диодный элементы, характеристики которых являются функциями состава газовой среды. Микроакустические сенсоры измеряют сдвиг частоты акустического резонатора в зависимости от состава газовой среды.

Электрохимические сенсоры уже в течение нескольких лет выпускает ряд фирм. Каталитические сенсоры находят широкое применение для контроля содержания горючих газов типа углеводородов. Полупроводниковые сенсоры при относительно низкой стоимости имеют малый ресурс работы и невысокую селективность в анализе газовых смесей. Микроэлектронные сенсоры привлекательны по той причине, что при их производстве используют стандартные линии изготовления интегральных схем, и в принципе удается в однокристальном исполнении совместить чувствительный элемент и схему электронного преобразователя [10]. Хотя микроакустические сенсоры не вышли за пределы исследовательских лабораторий, но по ряду контролируемых газов такие датчики имеют рекордно низкие пределы обнаружения.

При всем разнообразии устройств в любом из перечисленных типов сенсоров можно выделить два непременных элемента конструкции: чувствительный слой и первичный электронный преобразователь. Чувствительный слой в отдельных случаях может иметь толщину порядка атомных или молекулярных размеров, как например слой Гельмгольца в электрохимических сенсорах, а в случае каталитических сенсоров — адсорбционный слой. Но во многих других типах датчиков чувствитель-

¹ Работа ведется при поддержке РФФИ, проекты 01-03-32795 и 01-03-32796.

ный слой может представлять собой пленку микронной толщины, свойства которой будут определяться не только химическим составом, но и внутренней структурой пор, или строением внутренней поверхности пленки.

Сказанное можно коротко пояснить примерами. В каталитическом сенсоре горючих газов на основе тонкой платиновой проволоки (так называемый пеллистор) чувствительный слой образуется за счет адсорбированных молекул кислорода и горючих газов (водород, метан или другой углеводород). В сенсоре на основе полевого транзистора с открытым затвором чувствительный слой формируется на основе слоев диоксида кремния толщиной в несколько десятков нанометров.

Молекулярный механизм функционирования чувствительного слоя всегда включает стадии адсорбционного взаимодействия молекул газа с поверхностью слоя.

Настоящая статья посвящена анализу закономерностей молекулярного механизма процессов в чувствительных слоях и демонстрации конкретных примеров применения физико-химического подхода при проектировании газовых твердотельных сенсоров.

Проблема распознавания запахов

Современный подход к проблеме рецепции запахов сложился не сразу и имеет поучительную историю, о которой следует сказать несколько слов.

В начале XX века развитию волновой механики сопутствовало установление природы действия органов зрения и слуха. Естественной казалась попытка свести восприятие запаха к волновой природе. В своих воспоминаниях А. Ф. Иоффе писал:

"Меня увлекала идея о далеко идущей аналогии физической природы зрения, слуха, запаха и вкуса, создающих безграничное многообразие ощущений путем сочетания колебаний. Очень убедительным мне показалось объяснение цветовых ощущений: все разнообразие цветов возникает в зависимости от соотношения возбуждений всего трех видов нервных окончаний в глазу. Но ведь тогда и запахи с их многообразием должны иметь разумное объяснение — не может же существовать столько различных нервов, сколько разных запахов. Глазные нервы возбуждаются световыми волнами различной частоты, но как же возникают запахи? Не такими ли колебаниями, но только другой частоты, недоступной глазу?" [1].

Необходимо было время на то, чтобы были установлены закономерности взаимодействия газов с поверхностями твердых тел и стали ясными выработанные в процессе биологической эволюции механизмы функционирования сенсорных систем в живых организмах. Сенсорные системы воспринимают изменения сигнала в широких диапазонах и

обладают такой предельно высокой чувствительностью, которую только допускают законы физики и химии. Сигнал, воспринимаемый специализированной рецепторной клеткой, как правило, лишь незначительно превышает уровень энергии тепловых шумов молекул. Именно такому абсолютному порогу чувствительности соответствуют сигналы, равные энергии одного фотона или электрического напряжения, не превышающего 10 нВ/см, для зрительной, слуховой и электрорецепторной клеток соответственно. В случае хеморецепции (обоняния) многие органические соединения воспринимаются в концентрации менее 10—12 молекул в одном литре. Классическим примером может служить обонятельная клетка самца шелкопряда, способная обнаружить в воздухе одну единственную молекулу полового аттрактанта (феромона) [12].

Механизм распознавания запахов живыми организмами заключается в том, что рецепторы органов обоняния имеют центры, характеризуемые определенными стереохимическими размерами, и взаимодействие их с газообразными молекулами возможно лишь при условиях комплементарности, т. е. в условиях, отвечающих принципу "ключ — замок" или "гость — хозяин" [13—15]. Рецепторная клетка воспринимает сигнал определенной модальности и преобразует его в электрический потенциал, который кодируется, и как сенсорная информация передается в мозг. При этом используется многоуровневая система биологического усиления сигнала, генерируемого рецепторным ансамблем.

По-существу, рецепторные клетки — это высокоспециализированные молекулярные ансамбли, воспринимающие сигналы извне или изнутри организма и выполняющие функцию аналогового преобразования.

Понятие организованного молекулярного ансамбля

Понятие организованного молекулярного ансамбля [16—19] возникло в 70-е годы и оно связано с созданием новой стратегии научных исследований, которая получила название молекулярной инженерии. Это направление может быть охарактеризовано словами одного из пионеров работ в этой области Х. Куна:

"Молекулярная инженерия — это проектирование и создание сложной молекулярной системы, части которой соединены и взаимодействуют друг с другом как части механизма. В прошлом, да и в настоящее время основной интерес химиков был связан с определенными молекулярными веществами. Сегодня химик привлечен к созданию организованных систем заданным образом взаимодействующих молекул. Синтез молекул как будущих компонентов проектируемого ансамбля, как "разумного" ("intelligent") устройства становится захватывающей и обещающей целью препартив-

ной химии в приложениях к развитию микроэлектроники, интегральной оптики, элементов памяти, микросенсоров, новых катализаторов и устройств преобразования солнечного излучения. Очевидно, что инженерия на молекулярном уровне в значительной степени стимулируется молекулярной биологией, объясняющей как взаимодействие молекул приводит к образованию сложнейших систем. Но молекулярная инженерия имеет свой собственный стиль и определенный подход к проблемам, совершенно отличный от молекулярной биологии, можно сказать, свою культуру.

Важно отметить две особенности молекулярной инженерии. Во-первых, молекулярная инженерия — это инструмент конструирования организованных молекулярных агрегатов. Во-вторых, молекулярная инженерия — это тип мышления на уровне понятий о молекулярных механизмах: определение основных принципов молекулярных механизмов и поиск путей воссоздания подобных систем. Как сконструировать молекулярный ансамбль для заданной цели и как выбрать рациональный путь изготовления такого устройства?"

Организованный молекулярный ансамбль представляет собой группировку атомов или молекул, за счет химического или межмолекулярного взаимодействия встроенных в матрицу. Отличительной чертой организованного молекулярного ансамбля служит способность создавать соответствующий отклик на определенное возмущение системы, т. е. функциональность. Единичные атомные или молекулярные образования, составляющие ансамбль, определенным образом включены в матрицу и находятся с ней в электронфононном взаимодействии. Часто в количественном соотношении такие ансамбли присутствуют лишь в малом содержании, и поэтому многие физико-химические и термодинамические свойства матрицы могут незначительно отличаться от свойств индивидуального соединения.

Индивидуальной характеристикой ансамбля служит химический состав и близкий порядок группировки атомов или молекул его образующих. Простейший ансамбль состоит из единичного атома, как например, дефект или примесь кристаллической решетки, или единичной молекулы, встроенной во внутреннюю полость структурированной жидкости, классическим типом которой служит вода. Связь ансамбля с матрицей может осуществляться посредством слабого межмолекулярного взаимодействия, как в случае образования мицеля. В другом крайнем случае взаимодействие может осуществляться за счет образования прочных ковалентных связей, как например, при образовании рецепторных центров в полисилоксановой матрице. Размещение ансамбля в матрице задается способом получения системы и строением матрицы. При этом возможны случаи, когда ансамбли рас-

пределены в объеме матрицы, находясь на расстояниях, сопоставимых с характерным размером самого ансамбля. Этот случай представляет трехмерную топологию их размещения. Если размещение ансамблей задается плоскостью, то мы имеем дело с двумерной системой.

Способы получения организованных молекулярных ансамблей разнообразны. Так они могут быть получены в результате термодинамически равновесного процесса или как продукт самоорганизации определенных химически реагирующих сред. Удобным способом создания ансамблей служит метод Ленгмюра—Блоджетт, в котором осуществляется последовательный перенос с поверхности жидкой фазы на твердую подложку мономолекулярных слоев амфильтальных молекул. Это пример простейшего ансамбля. В таких системах отношение активной поверхности молекулярных слоев к объему системы сравнительно велико и, как следствие, взаимодействие молекул газовой фазы с амфильтальными молекулами вызывает значительное и быстрое изменение свойств всего ансамбля.

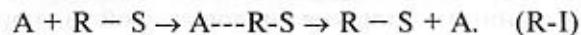
Другими методами создания молекулярных ансамблей служат процессы последовательной адсорбции нескольких компонентов (молекулярное наслаждение), процессы совместной коагуляции, например с участием полисилоксанов (золь-гель технология), или процессы с участием интеркаляторов и матриц с большой внутренней поверхностью, типа силикагелей и цеолитов.

Проблема создания химических сенсоров сводится к задаче построения молекулярного ансамбля, обладающего набором рецепторных группировок, способных в силу химических, стереохимических или топологических особенностей к селективному взаимодействию с определяемыми молекулами газа.

В интересующем нас плане рассмотрим два типа организованных молекулярных ансамблей. Это ансамбли на основе мультимолекулярных композиций, получаемых по методу Ленгмюра—Блоджетт, и тонкослойные системы на основе стеклообразных и аморфных слоев диоксида кремния, в матрице которого введены фрагменты органических молекул или кластеры металлов атомарной дисперсности.

Рецепция газа как адсорбционно-десорбционный процесс

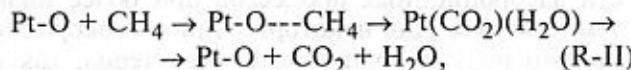
Процесс распознавания газа при работе твердотельного сенсора, как правило, представляет собой обратимую реакцию идентифицируемой молекулы газовой фазы A (агент) с рецепторным центром R, встроенным в матрицу чувствительного слоя S:



Промежуточное соединение A---R-S, или адсорбционный комплекс, возникает за счет сил

Ван-дер-Ваальса, поляризационного взаимодействия, донорно-акцепторной, координационной или водородной связи. Ниже подробно рассмотрены примеры сенсора на SO_2 , в котором рецепторные центры созданы на основе производных аминов. Такого характера процессы типичны для полупроводниковых, электрохимических, микроэлектронных, поляризационно-оптических и микроакустических сенсоров.

Для каталитических сенсоров, например горючих газов, схема усложняется и становится многостадийной, как в случае сенсора на основе платины:



где $\text{Pt}(\text{CO}_2)(\text{H}_2\text{O})$ — это адсорбированные продукты гетерогенного горения метана.

Скорость установления равновесия реакции (R-I) определяется скоростями адсорбции A и десорбции A с рецепторного центра R-S. Скорость установления равновесия реакции типа (R-II) определяется скоростями адсорбции A и десорбции продуктов реакции с поверхности каталитического датчика.

Напомним известные соотношения для скорости адсорбции [19, 20]:

$$w = \sigma(1 - \theta)p(2\pi MRT)^{-1/2} \exp(-E_{\text{адс}}/RT) \quad (1)$$

и скорости десорбции

$$w = \theta n_R v \exp(-E_{\text{дес}}/RT), \quad (2)$$

в которых p — парциальное давление газа A; σ — коэффициент конденсации молекул A; θ — степень заполнения рецепторных центров; M — молекулярная масса молекул A; $E_{\text{адс}}$ и $E_{\text{дес}}$ — энергии активации стадий адсорбции и десорбции соответственно; n_R — поверхностная концентрация рецепторных центров; v — частота термических колебаний адсорбционного комплекса, $v \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$; R — газовая постоянная; T — температура, К.

Скорость адсорбции — это быстрый процесс. Обычно энергия активации адсорбции $E_{\text{адс}}$ равна нулю или не превышает 8–10 кДж/моль, поэтому при парциальном давлении анализируемого газа на уровне 10^{-3} Торр или разбавлении 1 млн⁻¹ (1 часть на миллион), процесс адсорбции не ограничивает быстроту срабатывания датчика.

Процесс адсорбции всегда сопровождается выделением теплоты (экзотермический процесс). Схематично эта особенность показана на рис. 1. Важно обратить внимание, что при теплоте адсорбции q энергия активации обратного процесса десорбции равна $E_{\text{дес}} = E_{\text{адс}} + q$. Поэтому понятно, что если теплота адсорбции близка к значению химической связи 200–400 кДж/моль, то процесс десорбции при нормальных температурах станов-

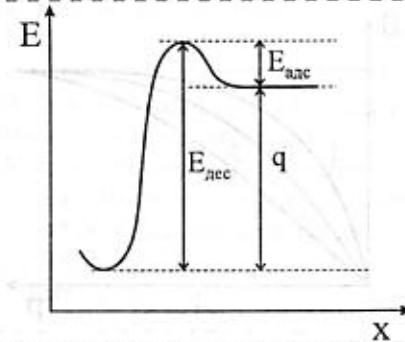


Рис. 1. Изменение энергии при взаимодействии в системе рецептор—агент:

q — теплота адсорбции агента на рецепторном центре; $E_{\text{адс}}$ — энергия активации процесса адсорбции; $E_{\text{дес}}$ — энергия активации процесса десорбции; x — координата реакции

ится необратимым. Конечно при проектировании газового сенсора предпочтительнее работа при нормальных температурах и тем самым определяется критерий создания соответствующего организованного молекулярного ансамбля как рецептора данного газа.

Значение теплоты адсорбции, допускающее работу сенсора при нормальной температуре, нетрудно определить. Ясно, что время срабатывания сенсора должно быть не больше, чем 60 с, отсюда, используя соотношение (2), найдем, что теплота взаимодействия рецептор—агент не должна превышать 60 кДж/моль. Вместе с тем необходимо принимать во внимание, что при существенном уменьшении q , происходит снижение степени заполнения рецепторных центров и как следствие, ухудшение такой характеристики сенсора, как порог обнаружения агента.

Другая важная для рассматриваемой проблемы особенность процесса адсорбции заключается в том, что степень заполнения поверхности θ нелинейно зависит от давления газа. При этом, естественно, нарушается линейность показаний сенсора. Типичная зависимость степени заполнения поверхности θ от давления газа p известна как изотерма Ленгмюра, которая представлена на рис. 2. Особенность такой зависимости в том, что в диапазоне малых концентраций степень заполнения линейно возрастает с концентрацией агента (область Генри). При относительно больших концентрациях заполнение поверхности достигает монослоистого покрытия и зависимость выходит на предельное значение. На рис. 2 можно видеть, что в зависимости от значения теплоты адсорбции монослоистое заполнение достигается при меньших значениях концентрации для случая сравнительно высоких значений теплоты адсорбции. Иными словами, это значит, что крутизна характеристики сенсора будет больше, или соответственно выше чувствитель-

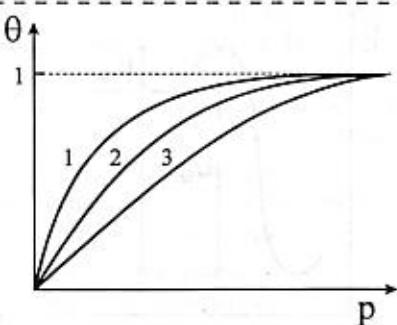


Рис. 2. Изотерма адсорбции Ленгмюра:
θ — степень заполнения поверхности; p — давление газа.
Изотермы различаются теплотой адсорбции: $q_1 > q_2 > q_3$

ность в системе рецептор—агент с относительно высоким тепловым эффектом.

Количественно такая зависимость определяется константой адсорбционного равновесия

$$a = Q_{\text{адс}} (Q_R Q_A)^{-1} \exp(q/RT), \quad (3)$$

где $Q_{\text{адс}}$, Q_R и Q_A — статистические суммы по состояниям соответственно для адсорбционного комплекса, рецептора и агента. Статистические суммы по состояниям включают в себя произведение статистических сомножителей, отвечающих поступательным, вращательным и колебательным степеням свободы движения молекулы газа, рецептора и адсорбционного комплекса.

Анализ экспериментальных данных по адсорбции таких газов и паров, как H_2O , NH_3 , O_2 , Br_2 показывает, что при нормальной температуре значение a имеет порядок $10^{-3} - 10^{-4}$ Торр⁻¹ или $10^{-18} - 10^{-17}$ л/молекул. Это означает, что при регистрации газа на уровне 1 млн⁻¹ степени заполнения рецепторных центров θ_R будут порядка 0,01—0,1 мономолекулярного заполнения.

Порог обнаружения определяется способом регистрации отклика при воздействии детектируемого газа на чувствительный элемент. Можно привести некоторые оценки, рассматривая для примера датчик влажности. Так для полупроводникового датчика воспользуемся данными о влиянии паров воды на проводимость германия. Известно, что методом измерения поверхностной проводимости фиксируется присутствие 10^{10} поверхностных состояний донорного типа, возникающих при адсорбции воды.

Это отвечает значениям $\theta = 10^{-4}$, а при характеристических значениях $a = 10^{-2}$ Торр⁻¹, получим значение $p_{\min} = \theta/a = 10^{-2}$ Торр (1,33 Па). При нормальной температуре можно этим способом регистрировать содержание водяного пара при разбавлениях $10^{-2}/23,7 = 4 \cdot 10^{-4}$ или 0,04 % отн.

влажности. Предел регистрации микроакустическим методом составляет 10^{-16} г/см², для воды это отвечает $2 \cdot 10^6$ молекул/см², т. е. предел обнаружения соответствует разбавлению $5 \cdot 10^{-8}$.

По мотивам упрощения конструкции и снижения энергопотребления конечно крайне желательна работа сенсора при температурах, близких к нормальной. Однако по ряду причин это невозможно сделать. Каталитические и электрохимические сенсоры работают при температурах 300—600 °C по причине того, что невозможно добиться обратимости адсорбционных процессов при более низких температурах. Для некоторых типов сенсоров, например полупроводниковых, характерна, так называемая, "колоколообразная" зависимость чувствительности датчика от температуры [3, 4]. Такая зависимость возникает как результат наложения двух эффектов при увеличении температуры: эффекта увеличения скорости адсорбционного процесса и эффекта снижения степени заполнения рецепторных центров.

Разработка чувствительного слоя с рецепторами SO_2

Возможности решения задачи создания организованных молекулярных ансамблей для детектирования определенных газов продемонстрируем на примере создания датчиков диоксида серы SO_2 . Детектирование SO_2 представляет масштабную задачу, важную в приложениях в металлургии, теплоэнергетике, нефтегазовой переработке и т. д. В промышленных районах концентрация SO_2 обычно достигает концентраций $0,05 - 0,1$ мг/м³. Максимальная разовая предельно допустимая концентрация SO_2 (ПДК) составляет $0,5$ мг/м³. Это соответствует 0,175 млн⁻¹.

Как слабая льюисовская кислота, диоксид серы образует с аминами соединения донорно-акцепторного типа, из которых наиболее подробно изучены соединения, получаемые при взаимодействии SO_2 с метилзамещенными аминами [21]. Известно, что SO_2 в этих соединениях служит акцептором, а донорная способность аминов возрастает с увеличением числа метильных заместителей. Для комплексов SO_2 с триметиламином в газовой фазе и в растворе гептана установлены их термодинамические характеристики. Имея в виду эти сведения, ясно, что рецепторный центр должен содержать функциональную группу алкилзамещенных аминов, и задача заключается в том, чтобы эти группы тем или иным preparативным методом встроить в твердотельную матрицу. Получение чувствительного слоя удобно осуществить, создав организованный молекулярный ансамбль на основе рецепторов замещенных аминов, распределенных в полисилоксановой матрице или в матрице слоя Ленгмюра—Блоджетт.

Во второй части статьи, которая будет опубликована в следующем номере журнала, мы рассмотрим результаты исследования процессов адсорбции SO_2 в полисилоксановых и мультимолекулярных слоях.

Список литературы

1. Jones A., Moseley P., Tofield B. The chemistry of solid state gas sensors, *Chemistry in Britain*, 1987 August, 749–754.
2. Yulong Xu, Xiaohua Zhou, O. Toft Sorensen. Oxygen sensors based on semiconducting metal oxides: an overview. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 65, 2–4.
3. Jones T. A., Walsh P. T. Flammable gas detection. *Platinum Metals Rev.*, 1988. V. 32, 50–60.
4. Gentry S. J., Jones T. A. The role of catalysis in solid-state gas sensors. *Sensors and Actuators*, 1986. V. 10, 141–163.
5. Francis Menil, Veronique Coillard, Claude Lucat. Critical review of nitrogen monoxide sensors for exhaust gases of lean burn engines. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 67, 1–23.
6. Morrison S. R. Mechanism of semiconductor gas sensor operation. *Sensors and Actuators*, 1987. V. 11, 283–287.
7. Seker F., Meeker K., Kuech T., Ellis A. B. Surface Chemistry Prototypical Bulk II–VI and III–V Semiconductors and Implications for Chemical Sensing. *Chem. Rev.* 2000, 100, 2505–2536.
8. Lloyd Spetz A., Tobias P., Uneus L., Svennningstop H. et al. High temperature catalytic metal field effect transistors for industrial applications. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 70, 67–76.
9. Kharitonov A. B., Zayats M., Lichtenstein A. et al. Enzyme monolayer-functionalized field effect transistors for biosensor applications. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 70, 222–231.
10. Hierlmann A., Lange D., Hagleitner C. et al. Application-specific sensor systems based on CMOS chemical microsensors. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 70, 2–11.
11. Иоффе А. Ф. Встречи с физиками. Л.: Наука, 1983. С. 10.
12. Варфоломеев С. Д., Евдокимов Ю. М., Островский М. А. Сенсорная биология, сенсорные технологии и создание новых органов чувств человека // Вестник РАН, 2000. Т. 70, № 2. С. 99–108.
13. Sugawara M., Kataoka M., Odashima K., Umezawa Y. Biomimetic ion-channel sensors based on host-guest molecular recognition in Langmuir-Blodgett membrane assemblies // *Thin Solid Films*, 1989. V. 180, 129–133.
14. Reichert W. M., Bruckner C. J., Joseph J. Langmuir-Blodgett films and black lipid membranes in biospecific surface-selective sensors. *Thin Solid Films*, 1987, v. 152, 345–376.
15. Pier Lucio Anelli, Neil Spencer, J. Fraser Stoddart. A molecular shuttle // *Journal American Chemical Society* 1991, 113, N 13, 5131–5133.
16. Репинский С. М. Организованные молекулярные ансамбли как рецепторные центры твердотельных химических датчиков // Журнал структурной химии 1993, т. 34, № 6, 86–89.
17. Repinsky S. M. Organized molecular assemblies: creation and investigation of their functional properties // *Macromol. Symp.* 1998. V. 136, 61–85.
18. Репинский С. М. Микроэлектроника: от кристалла к организованному молекулярному ансамблю // Природа, 1997, № 5, С. 8–18.
19. Лифшиц В. Г., Репинский С. М. Процессы на поверхности твердых тел. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2001, 650 с.
20. Репинский С. М. Введение в химическую физику поверхности твердых тел. Новосибирск: Наука, 1993. 221 с.
21. Васильева Л. Л., Дулыцев Ф. Н., Кручинин В. Н., Репинский С. М. Взаимодействие рецептор–агент в системе SO_2 –третичный амин // Журнал физической химии, 1997, т. 71, № 3. С. 521–525.

УДК 681.782.473:517

С. А. Матюнин, канд. техн. наук, доц., Самарский государственный аэрокосмический университет,
Г. И. Леонович, д-р техн. наук, доц.,
Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ГАУССА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОПТРОННЫХ СТРУКТУР

Рассмотрена аппроксимация характеристик оптоэлектронных элементов рядом функций Гаусса, позволяющая существенно сократить число членов ряда и повысить точность аппроксимации.

При решении задач проектирования и повышения точности оптоэлектронных измерительных преобразователей и других оптоэлектронных приборов часто возникает проблема адекватного математического описания передаточных характеристик информационных каналов [1–3]. Это связано с большим числом компонентов в составе оптронных структур (источники излучения, фотоприемники, оптические фильтры и т. д.), пространственные, спектральные, временные и температурные характеристики которых имеют сложную форму. При переходе от теоретического описания к практическим расчетам удачный выбор аппроксимирующей функции, обеспечивающей заданную точность аппроксимации при малом числе членов разложения, во многом определяет простоту и удобство дальнейшего анализа и синтеза преобразователей.

Применение степенных рядов и конформных отображений приводит, как правило, к значительному числу членов ряда [4, 5]. Например, аппроксимация цуга (отрезка) синусоидальной волны тригонометрическим рядом Фурье дает плохо сходящийся бесконечный ряд. Задача усложняется в случае теоретического анализа и оптимизации отдельных ключевых характеристик аппаратуры. Такая ситуация, в частности, имеет место при аппроксимации характеристик оптоэлектронных элементов многокомпонентных оптронных структур (МОС) спектрального взаимодействия, когда возникает необходимость с достаточно высокой точностью знать аналитическую зависимость спектральных и пространственных характеристик оптоэлектронных элементов (ОЭЭ) от многочисленных факторов.

Накопленный опыт теоретических и экспериментальных исследований позволяет авторам сделать вывод, что в качестве альтернативного метода

Во второй части статьи, которая будет опубликована в следующем номере журнала, мы рассмотрим результаты исследования процессов адсорбции SO_2 в полисилоксановых и мультимолекулярных слоях.

Список литературы

1. Jones A., Moseley P., Tofield B. The chemistry of solid state gas sensors, *Chemistry in Britain*, 1987 August, 749–754.
2. Yulong Xu, Xiaohua Zhou, O. Toft Sorensen. Oxygen sensors based on semiconducting metal oxides: an overview. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 65, 2–4.
3. Jones T. A., Walsh P. T. Flammable gas detection. *Platinum Metals Rev.*, 1988. V. 32, 50–60.
4. Gentry S. J., Jones T. A. The role of catalysis in solid-state gas sensors. *Sensors and Actuators*, 1986. V. 10, 141–163.
5. Francis Menil, Veronique Coillard, Claude Lucat. Critical review of nitrogen monoxide sensors for exhaust gases of lean burn engines. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 67, 1–23.
6. Morrison S. R. Mechanism of semiconductor gas sensor operation. *Sensors and Actuators*, 1987. V. 11, 283–287.
7. Seker F., Meeker K., Kuech T., Ellis A. B. Surface Chemistry Prototypical Bulk II–VI and III–V Semiconductors and Implications for Chemical Sensing. *Chem. Rev.* 2000, 100, 2505–2536.
8. Lloyd Spetz A., Tobias P., Uneus L., Svensson H. et al. High temperature catalytic metal field effect transistors for industrial applications. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 70, 67–76.
9. Kharitonov A. B., Zayats M., Lichtenstein A. et al. Enzyme monolayer-functionalized field effect transistors for biosensor applications. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 70, 222–231.
10. Hierlmann A., Lange D., Hagleitner C. et al. Application-specific sensor systems based on CMOS chemical microsensors. *Sensors and Actuators B* 2000. V. 70, 2–11.
11. Иоффе А. Ф. Встречи с физиками. Л.: Наука, 1983. С. 10.
12. Варфоломеев С. Д., Евдокимов Ю. М., Островский М. А. Сенсорная биология, сенсорные технологии и создание новых органов чувств человека // Вестник РАН, 2000. Т. 70, № 2. С. 99–108.
13. Sugawara M., Kataoka M., Odashima K., Umezawa Y. Biomimetic ion-channel sensors based on host-guest molecular recognition in Langmuir-Blodgett membrane assemblies // *Thin Solid Films*, 1989. V. 180, 129–133.
14. Reichert W. M., Bruckner C. J., Joseph J. Langmuir-Blodgett films and black lipid membranes in biospecific surface-selective sensors. *Thin Solid Films*, 1987, v. 152, 345–376.
15. Pier Lucio Anelli, Neil Spencer, J. Fraser Stoddart. A molecular shuttle // *Journal American Chemical Society* 1991, 113, N 13, 5131–5133.
16. Репинский С. М. Организованные молекулярные ансамбли как рецепторные центры твердотельных химических датчиков // Журнал структурной химии 1993, т. 34, № 6, 86–89.
17. Repinsky S. M. Organized molecular assemblies: creation and investigation of their functional properties // *Macromol. Symp.* 1998. V. 136, 61–85.
18. Репинский С. М. Микроэлектроника: от кристалла к организованному молекулярному ансамблю // Природа, 1997, № 5, С. 8–18.
19. Лифшиц В. Г., Репинский С. М. Процессы на поверхности твердых тел. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2001, 650 с.
20. Репинский С. М. Введение в химическую физику поверхности твердых тел. Новосибирск: Наука, 1993. 221 с.
21. Васильева Л. Л., Дулыцев Ф. Н., Кручинин В. Н., Репинский С. М. Взаимодействие рецептор–агент в системе SO_2 –третичный амин // Журнал физической химии, 1997, т. 71, № 3. С. 521–525.

УДК 681.782.473:517

С. А. Матюнин, канд. техн. наук, доц., Самарский государственный аэрокосмический университет,
Г. И. Леонович, д-р техн. наук, доц.,
Секция прикладных проблем при Президиуме РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ГАУССА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОПТРОННЫХ СТРУКТУР

Рассмотрена аппроксимация характеристик оптоэлектронных элементов рядом функций Гаусса, позволяющая существенно сократить число членов ряда и повысить точность аппроксимации.

При решении задач проектирования и повышения точности оптоэлектронных измерительных преобразователей и других оптоэлектронных приборов часто возникает проблема адекватного математического описания передаточных характеристик информационных каналов [1–3]. Это связано с большим числом компонентов в составе оптронных структур (источники излучения, фотоприемники, оптические фильтры и т. д.), пространственные, спектральные, временные и температурные характеристики которых имеют сложную форму. При переходе от теоретического описания к практическим расчетам удачный выбор аппроксимирующей функции, обеспечивающей заданную точность аппроксимации при малом числе членов разложения, во многом определяет простоту и удобство дальнейшего анализа и синтеза преобразователей.

Применение степенных рядов и конформных отображений приводит, как правило, к значительному числу членов ряда [4, 5]. Например, аппроксимация цуга (отрезка) синусоидальной волны тригонометрическим рядом Фурье дает плохо сходящийся бесконечный ряд. Задача усложняется в случае теоретического анализа и оптимизации отдельных ключевых характеристик аппаратуры. Такая ситуация, в частности, имеет место при аппроксимации характеристик оптоэлектронных элементов многокомпонентных оптронных структур (МОС) спектрального взаимодействия, когда возникает необходимость с достаточно высокой точностью знать аналитическую зависимость спектральных и пространственных характеристик оптоэлектронных элементов (ОЭЭ) от многочисленных факторов.

Накопленный опыт теоретических и экспериментальных исследований позволяет авторам сделать вывод, что в качестве альтернативного метода

аппроксимации передаточной функции МОС для обеспечения точности и быстрой сходимости ряда может использоваться ряд гауссиан [3, 4]. Главной отличительной особенностью такого ряда является возможность применения для аппроксимации как выпуклых, так и многоэкстремальных одно- и двумерных функций, свойственных для передаточных характеристик оптических элементов.

Преимущества выбранного метода можно пояснить на примере типового оптоэлектронного преобразователя. Обобщенную структурную схему любого оптоэлектронного измерительного устройства можно представить (рис. 1) в виде источника излучения (ИИ), приемника излучения (ПИ) с последующим преобразователем сигнала (ПС) и оптической среды, пропускающей излучение от источника к приемнику излучения [1–3]. При этом воздействие информативных параметров может осуществляться как на источник излучения, так и на оптическую среду, включающую в себя оптическую систему (ОС).

Например, в устройствах гальванической развязки аналоговых сигналов (оптранах) воздействие информативного параметра происходит посредством управления режимом работы ИИ, а в оптоэлектронных аналого-цифровых датчиках перемещения — путем пространственной модуляции ОС.

Во всех случаях изменение условий эксплуатации оказывается как на характеристиках источников излучения (для светодиодных ИИ температурный коэффициент изменения мощности излучения доходит до 1,5–2 %/°C), так и на характеристиках оптической среды, а также приемников излучения. Во многих случаях изменением параметров оптической среды можно пренебречь.

Часто для уменьшения потерь в оптической среде на поверхности ИИ, ПИ и ОС (линзы, делители светового потока и др.) наносятся тонкопленочные просветляющие покрытия. Получившиеся комбинированные элементы многокомпонентных оптронных структур обладают совершенно иными спектральными, пространственными и температурными характеристиками. Например, полученные в результате просветления температурные ха-

рактеристики МОС в значительной мере отличаются от исходных, а для полупроводниковых ИИ — существенно ухудшаются.

Проведенные экспериментальные исследования элементов МОС позволяют с высокой степенью точности представить их энергетические и спектральные характеристики в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Phi^*(\lambda, t) &= \Phi_M(t) \Phi[\lambda - \lambda_{\Phi_M}(t)]; \\ T^*(\lambda, t) &= T_M(t) T[\lambda - \lambda_{T_M}(t)]; \\ S^*(\lambda, t) &= S_M(t) S[\lambda - \lambda_{S_M}(t)],\end{aligned}\quad (1)$$

где $\Phi^*(\lambda, t)$, $T^*(\lambda, t)$, $S^*(\lambda, t)$, $\Phi[\lambda - \lambda_{\Phi_M}(t)]$, $T[\lambda - \lambda_{T_M}(t)]$, $S[\lambda - \lambda_{S_M}(t)]$ — абсолютные и относительные спектральные характеристики мощности излучения ИИ, пропускания оптической среды и чувствительности ПИ соответственно; $\Phi_M(t)$, $T_M(t)$, $S_M(t)$ — температурные зависимости максимумов излучения ИИ, пропускания оптической среды и чувствительности ПИ; $\lambda_{\Phi_M}(t)$, $\lambda_{T_M}(t)$, $\lambda_{S_M}(t)$ — температурные зависимости длины волны максимума излучения ИИ, пропускания ОС, чувствительности ПИ; λ , t — длина волны и температура соответственно.

Отметим, что практически независимо от физической природы элементов МОС наблюдается температурный сдвиг их спектральных характеристик.

Так, например, температурная зависимость абсолютной спектральной характеристики излучения арсенидогалиевого инфракрасного диода (АЛ115, АЛ118 и др.) аппроксимируется одной функцией Гаусса:

$$\begin{aligned}\Phi^*(\lambda, t) &= \Phi_M(t) \Phi[\lambda, t]; \\ \Phi[\lambda, t] &= e^{-K_\Phi(t)(\lambda - \lambda_M(t))^2},\end{aligned}\quad (2)$$

где $K_\Phi(t) = K_{\Phi_0} + K_{\Phi_1}(t - t_H) + K_{\Phi_2}(t - t_H)^2 + \dots$ — температурная зависимость полуширины спектральной характеристики;

$\lambda_M(t) = \lambda_{M0} + \lambda_{M1}(t - t_H) + \lambda_{M2}(t - t_H)^2 + \dots$; $t \in [t_H, t_B]$ — нижнее и верхнее значения температуры.

Погрешность аппроксимации составляет не более 4 % в диапазоне температур $-40 \dots +80^\circ\text{C}$. Формирование аппроксимирующей функции (2) из двух гауссиан снижает погрешность аппроксимации почти в 10 раз — до 0,45 %.

В общем случае аппроксимирующий ряд из функций Гаусса будет иметь вид

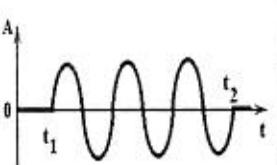
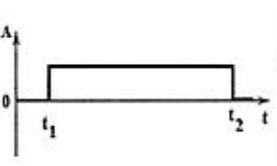
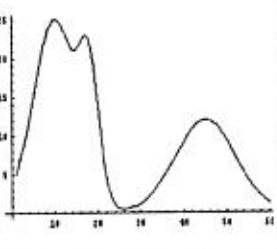
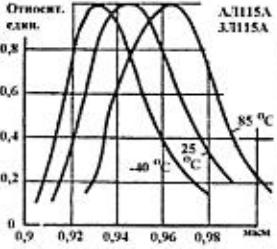
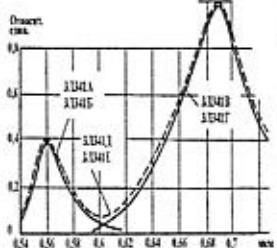
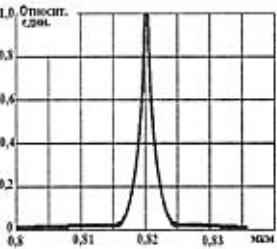
$$F[\lambda, t] = \sum_{i=0}^N A_i(t) e^{-K_i(t)(\lambda - \lambda_i(t))^2}, \quad (3)$$



Рис. 1. Обобщенная структурная схема оптоэлектронного устройства:

ИИ — источник излучения; ОС — оптическая система; ПИ — приемник излучения; ПС — преобразователь сигнала; ИИП — источник информативного параметра

Аппроксимация тестовых функций рядом Фурье и рядом гауссиан

№ п/п	Аппроксимируемая функция	Вид аппроксимируемой функции	Аппроксими- рующий ряд	Средняя от- носительная погрешность	Число членов ряда
1	$\Phi(\lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq t_1 \text{ и } t \geq t_2 \\ \sin(\omega t) & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases}$		Ряд гауссиан	0,1	8
2			Ряд Фурье	0,04	12
3	$\Phi(\lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq t_1 \text{ и } t \geq t_2 \\ 1 & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases}$		Ряд гауссиан	0,04	6
4			Ряд Фурье	0,08	10
5	$\Phi(\lambda) = e^{-K_\phi(\lambda - \lambda_M)^2} + e^{-K_\phi(\lambda - \lambda_M)^2} + e^{-K_\phi(\lambda - \lambda_M)^2}$		Ряд гауссиан	0,009	4
6			Ряд Фурье	0,1	8
7	Спектральная характеристика ИК светодиода АЛ115А		Ряд гауссиан	0,095	3
8			Ряд Фурье	0,01	110
9	Спектральная характеристика светодиода АЛ341Е (желтый)		Ряд гауссиан	0,12	6
10			Ряд Фурье		12
11	Спектральная характеристика узкополосного интерференционного фильтра $\Phi(\lambda) = \frac{A}{B + D \sin^2(2\pi n_2 d_2 / \lambda)}$		Ряд гауссиан	0,023	6
12			Ряд Фурье	0,11	13

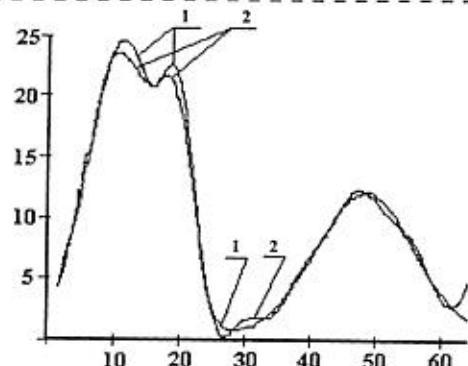


Рис. 2. Аппроксимация тестовой функции рядом Фурье:
1 — исходная тестовая функция; 2 — аппроксимирующая функция (восемь членов ряда Фурье)

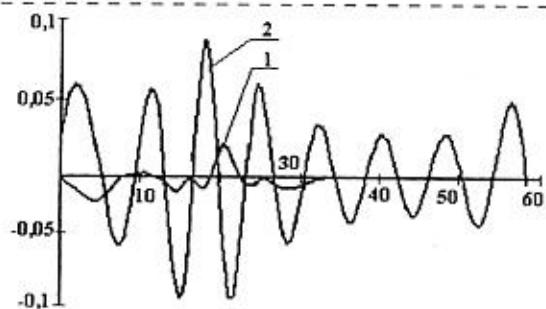


Рис. 3. Погрешность аппроксимации (отн. ед.):
1 — ряд гауссиан; 2 — ряд Фурье

а в качестве критерия оптимальности аппроксимации можно использовать критерий минимума интегральной средней квадратической ошибки аппроксимации в заданном диапазоне температур $[t_{\text{Н}}, t_{\text{В}}]$:

$$\delta = \int_{t_{\text{Н}}-\infty}^{t_{\text{В}}+\infty} (\Phi[\lambda, t] - \sum_{i=1}^N A_i(t) \times e^{-K_i(t)[\lambda - \lambda_i(t)]^2})^2 d\lambda \rightarrow \min. \quad (4)$$

Разработан алгоритм и программа решения уравнения (4) методом Гаусса—Зейделя.

В таблице приведены результаты аппроксимации некоторых тестовых функций рядом гауссиан и сравнения их с результатами аппроксимации

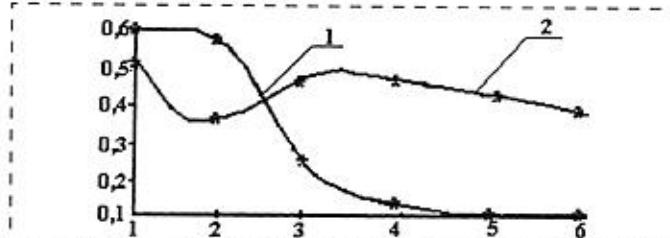


Рис. 4. Зависимость максимальной относительной погрешности аппроксимации от числа членов ряда:
1 — ряд гауссиан; 2 — ряд Фурье

тригонометрическим рядом Фурье, выбранным в качестве эталонного. Как видно из таблицы, для многих функций число членов и погрешность аппроксимации рядом гауссиан значительно ниже, чем рядом Фурье.

На рис. 2—4 в качестве примера представлены исходная тестовая функция (пп. 5 и 6 таблицы), результаты и погрешности аппроксимации рядом Фурье и рядом гауссиан, сравнительная зависимость погрешности аппроксимации от числа членов аппроксимирующих рядов.

Как видно на этих рисунках, предложенный для практических расчетов ряд гауссиан достаточно эффективен при аппроксимации спектральных характеристик элементов МОС. Полученные выводы с высокой степенью достоверности распространяются также на пространственные характеристики источников и приемников излучения, функции пропускания различных компонентов оптической среды.

Список литературы

- Порфириев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Л.: Машиностроение, 1989. 387 с.
- Конюхов Н. Е., Леонович Г. И., Матюшин С. А. Оптоэлектронные цифровые преобразователи перемещений с интерференционными элементами коррекции и обработки оптических сигналов // Приборы и системы управления. 1990. № 9. С. 18—20
- Матюшин С. А. Многокомпонентные оптоэлектронные аналоговые и аналого-цифровые преобразователи // Научно-техническая конференция "Датчик—2001". Крым, Судак, 24—31 мая 2001.
- Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 560 с.
- Фильчаков П. Ф. Численные и графические методы прикладной математики: Справочник. Киев.: Наукова думка, 1970. 800 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 621.373.826

В. В. Старков, канд. техн. наук,
 В. В. Аристов, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 ИПТМ РАН, пос. Черноголовка, Московская обл.;
 А. М. Желтиков, С. А. Магницкий, А. В. Тарасишин,
 МГУ им. М. В. Ломоносова, Международный лазерный центр

СОЗДАНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО АНОДНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Разработана технология изготовления трехмерных периодических структур из макропористого кремния, основанная на методе глубокого фотоанодного травления с периодической модуляцией тока травления во времени. Реализована эффективная схема расчета оптических свойств периодических структур с фотонными запрещенными зонами, основанная на численном интегрировании уравнений Максвелла с помощью метода конечных разностей. Исследуются свойства локализации поля в дефектных модах фотонных кристаллов и обсуждаются приложения кремниевых фотоннокристаллических структур в области микроскопии высокого разрешения, волноводной оптики, локального фотовозбуждения, нелинейной оптики.

Введение

Создание трехмерных фотонных кристаллов [1], характеризующихся наличием запрещенных зон в спектре пропускания в оптическом диапазоне частот, остается серьезной технологической проблемой. В настоящее время ведутся активные исследования путей решения этой задачи с помощью электронно-лучевой [2, 3] и голографической [4] литографии, методами двухфотонной полимеризации [5] и волоконно-оптических технологий [6], а также с использованием коллоидных кристаллов [7] и синтетического опала [8]. Как показано в работах [9, 10], один из перспективных путей создания структур с фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ) связан с использованием макропористого кремния.

В настоящей статье на основе эффективной схемы расчета оптических свойств конечных периодических структур с ФЗЗ анализируется распределение электромагнитного поля в ФЗЗ-структуратах с дефектом решетки, а

также спектр дефектных мод в запрещенных зонах фотонных кристаллов (ФК) на основе кремния. Обсуждаются приложения кремниевых фотоннокристаллических структур в областях микроскопии высокого разрешения, волноводной оптики, локального фотовозбуждения, нелинейной оптики. На основе дальнейшего развития предложенной ранее технологии глубокого фотоанодного травления (ГФАТ) кремния [11–13] изготовлена трехмерная пространственно-периодическая структура ФК.

Методика и результаты вычислений

Для исследования распределения поля в ФЗЗ-структурах использовался численный FDTD-метод решения уравнений Максвелла [14, 15]. При этом граничные условия должны быть сформулированы таким образом, чтобы световая волна, достигшая границы, полностью поглощалась ею без отражения обратно. К сожалению, для двух- и трехмерных

задач не существует идеально поглощающих и достаточно простых граничных условий. В наших расчетах использовались поглощающие граничные условия второго рода. Эти условия наилучшим образом позволяют снизить влияние отражения от границ на точность численных расчетов [15].

В качестве объекта исследования была выбрана структура, состоящая из переменного числа периодов (от пяти до десяти) цилиндрических воздушных пор, образующих треугольную решетку в матрице кремния. Для введения дефекта в двумерной ФЗЗ-структуре удалялся один из рядов воздушных пор. Поскольку в области полной запрещенной зоны в выбранной нами треугольной решетке воздушных цилиндров в кремнии глубина проникновения светового поля в ФК (скин-слой) не превышает одного периода структуры, для определения спектра пропускания решетки с дефектом рассматривались структуры, в которых дефект вносился периодическим образом (с периодом λ вдоль оси Y). Другими словами, фактически решалась задача о распространении света в сверхрешетке.

Контрольные расчеты, выполненные для сверхрешеток, различающихся только периодом λ , показали, что распределение электромагнитного поля в дефектной моде и спектр дефектных мод не зависят от периода λ . Помимо удобства такая схема расчетов позволяет определить уровень шумов, связанных с влиянием света, локализованного в соседних дефектах (cross talk), что представляет интерес для приложений подобных ФЗЗ-структур в системах оптической памяти и оптической обработки информации. Вычисле-

ния продолжались до тех пор, пока не переставали меняться усредненные по периоду значения электрического и магнитного поля и их квадратов. Выходными данными являлись усредненные по периоду квадраты (интенсивности) электрического и магнитного полей.

На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) приведены двумерные распределения среднего квадрата

электрического поля $\overline{E^2}$ в Ф33-структуре описанного выше типа, состоящей из десяти периодов вдоль оси X с периодом дефектов, равным $5a$, для отношения $a/\lambda = 0,454$. Анализ пространственного распределения электромагнитного поля показывает, что в данной структуре свет испытывает канализование вдоль дефекта, поле при этом локализовано в центре дефекта. На некоторых участках канала диаметр пучка оказывается порядка $\lambda/10$ (см. рис. 1), что в 5 раз меньше дифракционного предела для светового пучка, сфокусированного в воздухе. Интенсивность света в центре дефекта в несколько сот раз выше интенсивности на краях канала, что свидетельствует о высоком контрасте канализования пучка. Групповая скорость света при этом существенно уменьшается, что указывает на возможность использования дефектных мод Ф33-структур для создания управляемых линий оптической задержки, аналогично оптическим линиям задержки на основе одномерных Ф33-структур, описанных в работе [16].

Распределение среднего квадрата напряженности электрического поля $\overline{E^2}$ на выходе Ф33-структуры представлено на рис. 2 (см. вторую сторону обложки). Поле в данных условиях локализовано в поперечном направлении на пространственном масштабе, меньшем длины волны излучения ($\lambda/10$), и спадает экспоненциально вдоль оси X . Свойства данного поля подобны свойствам нерадиационной волны, локали-

зуемой вблизи поверхности образца в микроскопии ближнего поля, что открывает возможность использования Ф33-структур в качестве элементов оптической микроскопии ближнего поля [17], осуществляющих эффективное формирование нерадиационных волн. На основе принципа взаимности получаем, что Ф33-структуры с дефектом решетки могут быть также использованы для анализа нерадиационного поля вблизи образца, что позволяет реализовать режим сбора информации в микроскопии ближнего поля.

Возможности достижения высокого пространственного разрешения измерений, проводимых с помощью светового поля, формируемого Ф33-структурой рассматриваемого типа, были продемонстрированы расчетами [17]. Результаты этих расчетов показывают, что неизлучающие волны, формируемые в дефектных модах фотонных кристаллов, позволяют реализовать схемы оптической микроскопии ближнего поля (рис. 3) с пространственным разрешением, превышающим длину волны падающего излучения, и достаточно высоким отношением сигнал/шум.

Несмотря на то, что вся энергия излучения в нерадиационных волнах распространяется лишь вдоль выходной поверхности Ф33-структуры, не отрываясь от нее, высокая концентрация светового поля на выходе подобной структуры может приводить к физически наблюдаемым явлениям в ближней зоне. Это поле может быть использовано, в частности, для локального возбуждения атомов либо молекул, если их разместить на месте исследуемого образца (рис. 3).

Технология изготовления трехмерных периодических структур на основе макропористого кремния

Технология изготовления двумерных периодических структур из макропористого кремния на ос-

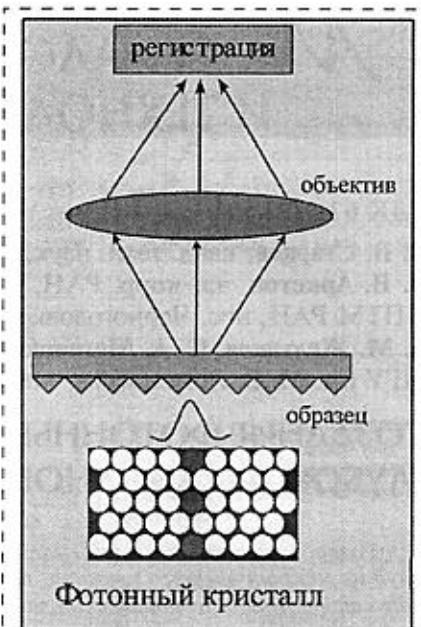


Рис. 3. Схема оптической микроскопии ближнего поля

нове методики глубокого фотолитографии n -Si была достаточно подробно описана в работе [11]. Авторы работы [9] сформировали систему макропористых областей кремния, разделенных с помощью фотолитографии и глубокого травления в плазме SF_6 топологическими дорожками. Авторы назвали полученную структуру трехмерной. Однако, с точки зрения Ф33, такая структура не может считаться трехмерной. В работе [8] предложены различные варианты коллоидных кристаллов, представляющих собой трехмерно-периодические структуры, полученные путем плотной упаковки тем или иным способом сферических объектов с одинаковыми размерами. В качестве таких сфер могут выступать плотноупакованные SiO_2 -сферы (см. работы Yoshino K. с соавторами). В этом случае f.c.c.-структуры (face-centered cubic structure) с воздушными прослойками между сферами получили название синтетических опалов. К недостаткам синтетических опалов, также, как и других коллоидных кристаллов, следует отнести значительную проблематичность кон-

тролируемого введения в структуру необходимых дефектов, что является следствием метода самоорганизации в процессе создания таких структур (self-assembly method). Это обстоятельство существенно ограничивает область применения коллоидных кристаллов в качестве ФК-структур, поскольку, как это было показано в предыдущем разделе, контролируемое присутствие дефектов в структуре лежит в основе значительной области применения устройств на базе ФК.

Наиболее близким приближением к трехмерной структуре ФК на основе макропористого кремния является структура, предложенная в [12]. Как и в работах [9, 11], периодичность оптических свойств по осям X и Y в предлагаемом авторами варианте достигается периодичным расположением цилиндрических макропор в матрице кремния. Контролируемое введение дефектов в указанную структуру реализуется при нарушении периодичности расположения пор, что обеспечивается соответствующим изменением топологии фотошаблона, дающего требуемую периодичность затравочных V-образных канавок [12]. В третьем направлении (по оси Z) периодичность создается изменением диаметра пор.

Известно, что в зависимости от условий термического окисления монокристаллического кремния (окисление — влажное, сухое, в парах хлора и т. д.) объем окисленного материала возрастает в 2–2,3 раза. Исходя из этого, несложно предложить структуру пор по глубине, которая изображена на рис. 4, а (см. вторую сторону обложки) в виде черных областей. В такой структуре после полного прокисления матрицы кремния (зеленые области на рис. 4, а) может быть реализована некая структура "обращенного опала" (рис. 4, б). В рассматриваемом случае более тонкие части пор должны сомкнуться за счет расширения кремния при его окислении, а более

широкие части пор в результате окажутся захлопнутыми и сформируют газовые области (светлые участки на рис. 4, б), расположение которых строго определяется конструктивно-технологическими параметрами процессов ГФАТ и окисления кремния. Остальная часть структуры (зеленого цвета на рис. 4, б) представляет собой окисленный кремний SiO_2 . В идеализированном варианте (увеличение объема при окислении в 2 раза) размер $A = 1,5L$, а размер $B = 0,5L$. Следует отметить, что на практике приходится учитывать необходимость прокисления в первую очередь наиболее глубоких областей структуры, затем последовательно — выше расположенных слоев, что объясняется необходимостью доставки газообразного кислорода в область окисления. Поэтому геометрические размеры будут несколько отличными от изображенных на рис. 4, а.

Как было показано в работах [11, 12], при реализации в схеме ГФАТ режима генератора напряжения становится возможным контроль за силой тока травления с помощью степени подсветки образца в процессе травления. Это создает возможность целенаправленного изменения формы пор по глубине. Представленный на рис. 5 (см. вторую сторону обложки) фрагмент скола кремниевой структуры был получен на кремнии n -типа проводимости с ориентацией поверхности (100) и удельным сопротивлением 7–20 Ом · см при ГФАТ в 3 %-ном водном растворе плавиковой кислоты и периодической модуляцией фототока травления с 10 до 1 $\text{mA} \cdot \text{см}^{-2}$. При этом на поверхности кремниевой пластины предварительно формировались обратные пирамиды травления с площадью основания $4 \times 4 \text{ мкм}^2$ [11]. На рис. 5 представлена периодическая структура без введенных дефектных плоскостей. Дальнейшая оптимизация геометрических размеров элементов

подобных структур с учетом проведенных в настоящей работе расчетов позволит создать квазитрехмерные ФК на основе как самого кремния, так и его оксида — структуры типа обращенного опала. При этом конструктивно-технологические характеристики применяемых процессов позволяют формировать структуры ФК с требуемыми распределением дефектных уровней в их запрещенных зонах с помощью стандартных приемов кремниевой технологии.

Выводы

Таким образом, разработанная технология обработки кремния с использованием глубокого анодного травления с периодической модуляцией тока травления во времени позволяет изготавливать трехмерные периодические структуры на основе макропористого кремния. Подобная методика дает возможность получать трехмерные периодические структуры с размером пространственного периода порядка микрона и менее и представляется в связи с этим чрезвычайно перспективной для изготовления трехмерных структур с фотонными запрещенными зонами и контролируемым расположением дефектных уровней в запрещенной зоне.

Выполненный анализ распределения электромагнитного поля в двумерных ФЗЗ-структурках с дефектом решетки и исследование спектра дефектных мод в запрещенных зонах таких структур позволили выявить ряд важных свойств локализации поля в фотонных кристаллах. Световое поле в этих условиях может быть локализовано в области размером менее длины волны, а поле на выходе ФЗЗ-структурки обладает свойствами нерадиационной волны, что позволяет достичь пространственно-разрешения в ближнем поле, существенно меньшем длины волны излучения.

Режимы распространения световых пучков, которые могут быть реализованы с помощью

Ф33-структур, представляются перспективными для решения целого ряда задач оптической микроскопии ближнего поля, повышения плотности хранения информации в устройствах оптической памяти, а также увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий.

Список литературы

1. Yablonovite E. // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. V. 10. P. 283–295;
2. Soukoulis C. Photonic Band Gap Materials // Ed., Dordrecht: Kluwer Academic, 1996;
3. Joannopoulos J., Meade R. and Winn J. // Photonic Crystals, Princeton: Princeton Univ., 1995.
4. Baba T. and Matsuzaki T. // Jpn. J. Appl. Phys., 1996. Part 1, 35, N 2B. P. 1348.
5. Cheng C. C. and Scherer A. // J. Vacuum Sci. Technol. B, 1995, 13, N 6. P. 2696.
6. Berger V., Gauthier-Lafaye O. and Costard // E., Electron. Lett. 1997, 33, N 5. P. 425.
7. Tarhan I. I. and Watson G. H. Photonic Band Gaps and Localization / Ed. C. M. Soukoulis New York: Plenum, 1993. P. 93.
8. Astratov V. N., Vlasov Yu. A., Karimov O. Z., Kaplyanskii A. A., Musikhin Yu. G., Berti N. A., Bogomolov V. N. and Prokofiev A. V. // Phys. Lett. A. 1996. Vol. 222, P. 349–353;
9. Bogomolov V. N., Gaponenko S. V., Kapitonov A. M., Prokofiev A. V., Ponyavina A. N., Silvanovich N. I. and Samoilovich S. M. // Appl. Phys. A. 1996. Vol. 63. P. 613;
10. Vlasov Yu. A., Astratov V. N., Karimov O. Z., Kaplyanskii A. A., Bogomolov V. N. and Prokofiev A. V. // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 55. P. 13357;
11. Yoshino K., Tada K., Ozaki M., Zakhidov A. A. and Baughman R. H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. Part 2, 36. N 6A. P. L714;
12. Yoshino K., Saton S., Shimoda Yu., Kawagishi Yo., Nakayama K. and Ozaki M. // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. Vol. 38. P. L961–L963.
13. Ottow S., Lehmann V., Foll H. // J. Electrochem. Soc., 1996. 143. P. 385.
14. Gruning U., Lehmann V., Ottow S., Busch K. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. P. 747–749.
15. Taflove A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method // Norwood, MA: Artech House, 1995.
16. Желников А. М., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. // ЖЭТФ. 2000. Vol. 117. Вып. 4. С. 1–10.
17. Scalora M., Flynn R. J., Reinhardt S. B., Fork R. L., Bloemer M. J., Tocci M. D., Bowden C. M., Ledbetter H., Bendickson J., Dowling J. P., Leavitt R. P. // Phys. Rev. 1996. Vol. 54, P. R1078.
18. Желников А. М., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. // Письма ЖЭТФ. 1999. Vol. 70, P. 323;
19. Magnitskii S. A., Tarasishin A. V., Zheltikov A. M. // Appl. Phys. B. December 1999, Vol. 69.

УДК 621.315.592

В. П. Бокарёв, канд. хим. наук, О. П. Гущин, А. Д. Просий, А. А. Трусов, А. Н. Дюпина, АООТ "НИИМЭ" и "Микрон"

ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ ЗАТВОРОВ В ДВУХСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ РЕАКТИВНО-ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Рассмотрен двухстадийный процесс реактивно-ионного травления (РИТ), обладающий повышенными анизотропией и селективностью к оксиду. Первую стадию РИТ проводили в плазме смеси SF₆ + O₂. Необходимую анизотропию обеспечивали дополнительным подкислением поверхности. На второй стадии травление Si проводили в плазме смеси хлорсодержащих газов и гелия.

Разработанный процесс был успешно применен в КМОП-маршруте изготовления тестового кристалла с 0,5 мкм проектными нормами на операциях формирования затвора.

Одной из наиболее сложных технологических проблем при изготовлении КМОП СБИС с субмикронными размерами является формирование поликремниевых затворов, при котором необходимо одновременно решать вопросы обеспечения высоких анизотропии и селективности травления.

Имеющийся стандартный процесс травления в производстве ИС с размерами более 1 мкм, основанный на травлении в плазме гексафторида серы с кислородом, обладает низкой селективностью к оксиду (колеблется от 2,8:1 до 3:1) и переменным профилем травления из-за низкой анизотропии процесса травления, что делает невозможным его применение для травления субмикронных поликремниевых затворов (рис. 1, 2, см. четвертую страницу обложки).

Вопросу селективного травления поликремния, ввиду его важности для технологии микроэлектроники, посвящено большое число работ [1–8].

Для получения вертикального профиля травления поликремния ранее использовали плазму смесей различного состава, содержащую хлор: Cl₂–Cl₂ [1]; ClF₃–Cl₂ [2]; CCl₃F [3]; CCl₂F₂–O₂ [4]. При этом предполагалось, что при применении в качестве травящих газов CCl₃F и CCl₂F₂ основным травящим агентом являются атомы хлора, так как энергия связи C–F больше энергии связи C–Cl [5].

В настоящее время за рубежом для обеспечения высоких селективности и анизотропии процесса травления поликремния процесс реактивно-ионного травления (РИТ) поликремния проводят в плазме смесей неорганических галогенидов, как правило, на основе бромистого либо йодистого водорода: Cl₂–HCl–He [6]; HCl–BCl₃–Cl₂–CF₄–O₂ [7].

Ф33-структур, представляются перспективными для решения целого ряда задач оптической микроскопии ближнего поля, повышения плотности хранения информации в устройствах оптической памяти, а также увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий.

Список литературы

1. Yablonovite E. // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. V. 10. P. 283–295;
2. Soukoulis C. Photonic Band Gap Materials // Ed., Dordrecht: Kluwer Academic, 1996;
3. Joannopoulos J., Meade R. and Winn J. // Photonic Crystals, Princeton: Princeton Univ., 1995.
4. Baba T. and Matsuzaki T. // Jpn. J. Appl. Phys., 1996. Part 1, 35, N 2B. P. 1348.
5. Cheng C. C. and Scherer A. // J. Vacuum Sci. Technol. B, 1995, 13, N 6. P. 2696.
6. Berger V., Gauthier-Lafaye O. and Costard // E., Electron. Lett. 1997, 33, N 5. P. 425.
7. Borisov R. A., Dorojina G. N., Kotorev N. I., Kozenkov V. M., Magnitskii S. A., Malakhov D. V., Tarashishin A. V., Zheltikov A. M. // Appl. Phys. B, 67, 1998, 765.
8. Knight J. C., Birks T. A., Russel P. St. J. and Atkin D. M. // Opt. Lett., 1996, 21, 1547.
9. Tarhan I. I. and Watson G. H. Photonic Band Gaps and Localization / Ed. C. M. Soukoulis New York: Plenum, 1993. P. 93.
10. Aristov V. V., Starkov V. V., Schabel'nikov L. G., Kuznetsov S. M., Ushakova A. P., Grigoriev M. V., Tseitlin V. M. // Optics Communication. 1999. Vol. 161. P. 203–208.
11. Aristov V. V., Magnitskii S. A., Starkov V. V., Tarashishin A. V. and Zheltikov A. M. // Laser Physics. 1999. Vol. 9, N 6. P. 1–6.
12. Aristov V. V., Magnitskii S. A., Starkov V. V., Tarashishin A. V. and Zheltikov A. M. // Optics Communication. 1999. Vol. 161. P. 203–208.
13. Gruning U., Lehmann V., Ottow S., Busch K. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. P. 747–749.
14. Taflove A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method // Norwood, MA: Artech House, 1995.
15. Желтиков А. М., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. // ЖЭТФ. 2000. Vol. 117. Вып. 4. С. 1–10.
16. Scalora M., Flynn R. J., Reinhardt S. B., Fork R. L., Bloemer M. J., Tocci M. D., Bowden C. M., Ledbetter H., Benedictson J., Dowling J. P., Leavitt R. P. // Phys. Rev. 1996. Vol. 54, P. R1078.
17. Желтиков А. М., Магницкий С. А., Тарасишин А. В. // Письма ЖЭТФ. 1999. Vol. 70, P. 323;
18. Magnitskii S. A., Tarashishin A. V., Zheltikov A. M. // Appl. Phys. B. December 1999, Vol. 69.

УДК 621.315.592

В. П. Бокарёв, канд. хим. наук, О. П. Гущин, А. Д. Просий, А. А. Трусов, А. Н. Дюпина, АООТ "НИИМЭ" и "Микрон"

ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ ЗАТВОРОВ В ДВУХСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ РЕАКТИВНО-ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Рассмотрен двухстадийный процесс реактивно-ионного травления (РИТ), обладающий повышенными анизотропией и селективностью к оксиду. Первую стадию РИТ проводили в плазме смеси SF₆ + O₂. Необходимую анизотропию обеспечивали дополнительным подкислением поверхности. На второй стадии травление Si проводили в плазме смеси хлорсодержащих газов и гелия.

Разработанный процесс был успешно применен в КМОП-маршруте изготовления тестового кристалла с 0,5 мкм проектными нормами на операциях формирования затвора.

Одной из наиболее сложных технологических проблем при изготовлении КМОП СБИС с субмикронными размерами является формирование поликремниевых затворов, при котором необходимо одновременно решать вопросы обеспечения высоких анизотропии и селективности травления.

Имеющийся стандартный процесс травления в производстве ИС с размерами более 1 мкм, основанный на травлении в плазме гексафторида серы с кислородом, обладает низкой селективностью к оксиду (колеблется от 2,8:1 до 3:1) и переменным профилем травления из-за низкой анизотропии процесса травления, что делает невозможным его применение для травления субмикронных поликремниевых затворов (рис. 1, 2, см. четвертую страницу обложки).

Вопросу селективного травления поликремния, ввиду его важности для технологии микроэлектроники, посвящено большое число работ [1–8].

Для получения вертикального профиля травления поликремния ранее использовали плазму смесей различного состава, содержащую хлор: C₂F₆–Cl₂ [1]; ClF₃–Cl₂ [2]; CCl₃F [3]; CCl₂F₂–O₂ [4]. При этом предполагалось, что при применении в качестве травящих газов CCl₃F и CCl₂F₂ основным травящим агентом являются атомы хлора, так как энергия связи C–F больше энергии связи C–Cl [5].

В настоящее время за рубежом для обеспечения высоких селективности и анизотропии процесса травления поликремния процесс реактивно-ионного травления (РИТ) поликремния проводят в плазме смесей неорганических галогенидов, как правило, на основе бромистого либо йодистого водорода: Cl₂–HCl–He [6]; HCl–BCl₃–Cl₂–CF₄–O₂ [7].

и HI [8]. Анизотропия травления в данных смесях обеспечивается адсорбцией на боковых стенках галогенидов с невысокой химической активностью к поликремнию и отсутствием распыления ионами в латеральном направлении. Однако использование данных газов на отечественных предприятиях требует решения ряда сложных организационных и технологических вопросов. Поэтому с переходом к субмикронным проектным нормам необходима разработка процесса с повышенными селективностью и анизотропией, основанного на травлении в плазме традиционно применяющихся газов.

Нами исследован и разработан двухстадийный процесс травления поликремния, обладающий повышенными анизотропией и селективностью к оксиду.

Исследование проводилось на кремниевых пластинах диаметром 150 мм со слоями термического оксида толщиной 25 нм и поликристаллического кремния толщиной 390 нм. Фоторезистовая маска (ФРМ) с субмикронными элементами формировалась с применением специально разработанных приемов, обеспечивающих улучшение разрешения в процессах литографии (рис. 3, см. четвертую сторону обложки).

По данным РЭМ-анализа при максимальной и средней дозе экспонирования на элементах с 0,5-микрометровыми размерами может наблюдаться 30 %-ное недопроявление фотомаски, величина которого зависит от дозы экспонирования.

Для проведения травления слоя Si* через ФРМ использовали как стандартный (базовый) процесс травления, так и разработанный нами двухстадийный процесс травления. Стандартный процесс травления проводили в плазме смеси гексафторида серы с кислородом. Разработанный нами процесс должен был обеспечить допроявление субмикронных элементов фотомаски на первой стадии и анизотропное селективное травление поликремния на второй стадии. Первую стадию травления проводили в плазме смеси SF₆ с O₂. Присутствие кислорода в смеси объясняется необходимостью поддержания требуемой анизотропии профиля травления, так как травление поликристаллического кремния в плазме чистого SF₆ характеризуется наклонным профилем. Поэтому необходимую анизотропию травления на первой стадии в плазме смеси SF₆ + O₂ обеспечивали дополнительным подкислением поверхности. Скорость травления Si* на первой стадии составляла 120 нм/мин, SiO₂ — 15 нм/мин,

а фоторезиста — 53,6 нм/мин. Селективность травления Si* к SiO₂ равнялась 8 : 1.

На второй стадии травление Si* проводили в плазме смеси хлорсодержащих газов и гелия. Травление в данной смеси характеризуется большей селективностью к SiO₂ по сравнению со смесью, примененной на первой стадии при одинаковом уровне ВЧ мощности. Скорости травления Si* и SiO₂ на второй стадии были, соответственно, 305 и 30 нм/мин, а селективность травления Si* к SiO₂ составляла 10 : 1.

На рис. 1, 2, 4 представлены профили протравленной поверхности поликремния, полученные как после проведения стандартного процесса травления (рис. 1, 2), так и протравленные по разработанному процессу (рис. 4, см. четвертую сторону обложки).

Как видно на рисунках, базовый процесс отличается неустойчивостью и не обеспечивает вертикальный профиль травления поликремниевых затворов.

В отличие от базового, разработанный процесс обладает повышенной селективностью и обеспечивает вертикальный профиль травления.

Таким образом, разработанный двухстадийный процесс травления Si* позволяет реализовать размер поликремниевых затворов, равный 0,5 мкм. Поэтому разработанный нами процесс был успешно применен в КМОП-маршруте изготовления тестового кристалла с 0,5-микрометровыми проектными нормами на операциях формирования затвора.

Список литературы

1. Adams A. C., Capio C. D. // J. Electrochem. Soc. 1981. V. 128. P. 366.
2. Flamm D. L., Wang D. N. K., Maydan D. // J. Electrochem. Soc. 1982. V. 129. P. 2755.
3. Endo N., Kurogi Y. // IEEE Trans. Electron. Devices. 1980. V. ED-27. P. 1346.
4. Paraszczak J., Hatzakis H. // J. Vac. Sci. Technol. 1981. V. 19. N 4. P. 1412.
5. Mayer J. R., Simons J. P. // Adv. Photochem. 1964. V. 2. P. 137.
6. Shoeborn P. Патент США. Класс 156-64. № 5242536.07.09.1993.
7. Wang D. N. Патент США. Класс 252-79.3. № 5219485.15.06.1993.
8. Richter H. H., Aminpur M-A., Erzgraber H. B., Wolff A., Kruger D., Denoff A., Reetz M. // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. V. 36, Part I, No. 7B, p. 4849—4853.

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

УДК [579.087.9+57.083.3+541.64]:577.175.624

**Ю. В. Шувалова, Т. П. Елисеева,
А. Н. Решетилов, д-р хим. наук,
Институт биохимии и физиологии
микроорганизмов РАН, Московская обл.,
г. Пущино,
Е. В. Язынина, А. В. Жердев, канд. биол. наук,
Б. Б. Дзантиев, д-р хим. наук,
Институт биохимии им. А. Н. Баха, Москва**

ИММУНОСЕНСОРНАЯ ДЕТЕКЦИЯ ТЕСТОСТЕРОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ БЫСТРОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ*

Отписана разработанная модель иммуносенсора для определения гормона тестостерона, где преобразователем сигнала является pH-чувствительный полевой транзистор. Для быстрого разделения прореагировавших и не прореагировавших иммунокомпонентов использовали полиэлектролитные взаимодействия. Общее время анализа не превышало 30 мин, из них формирование биорецептора занимало 15–20 мин и измерение сенсором 1–2 мин. Определение тестостерона проводили в диапазоне концентраций 3–300 нг/мл. Ошибка измерения не превышала 10 %.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция к разработке диагностических тестов, которые позволили бы оценивать состояние здоровья и выявлять заболевания человека децентрализовано, в частности, на дому. Основным подходом для специфического выявления антигенов различной природы, применяемым в отечественной медико-диагностической практике, является твердофазный иммуноферментный анализ (ИФА). Методы ИФА, наряду с безусловными достоинствами (чувствительность, специфичность), обладают и рядом недостатков, которые существенно ограничивают сферу их применения. Продолжительность анализа при проведении ИФА довольно высокая (несколько часов), что обусловлено низкой скоростью диффузионных процессов в используемых гетерогенных системах; кроме того детекция активности ферментной метки в ИФА предполагает применение достаточно дорогостоящего стационарного

оборудования [1, 2]. Сочетание различных схем иммуноанализа с биосенсорными методами позволяет при сохранении чувствительности и специфичности значительно упростить процедуру анализа (более простые методики подготовки и анализа образца, несложное оборудование), а также расширить сферу их практического применения без привлечения высококвалифицированного обслуживающего персонала. Среди биосенсоров широкое распространение получили электрохимические сенсоры и, в частности, сенсоры на основе pH-чувствительных полевых транзисторов [3, 4]. Крайне важными свойствами полевых транзисторов (ПТ), определяющими интерес к ним многих исследователей, является возможность значительной миниатюризации измерительных устройств, широкий выбор наиболее адекватной методики для формирования рецептора, возможность пространственного сопряжения датчика и системы обработки результатов анализа [5–7].

В России к настоящему времени отсутствуют отечественные коммерчески доступные иммуносенсорные системы для контроля биологически активных веществ. В настоящей работе представлена модель иммуносенсора на основе pH-чувствительного полевого транзистора для детекции гормона тестостерона. Для разделения прореагировавших и не прореагировавших иммунокомпонентов с целью ускорения процедуры анализа использованы полиэлектролитные взаимодействия (применение этого принципа в твердофазном ИФА для детекции пестицидов было показано в работах [8, 9]). Данная модель может рассматриваться как прототип промышленного биосенсорного анализатора.

Материалы и методы

В работе использовали в качестве полианиона и поликатиона фракции полиметакриловой кислоты (ПМАК) средневесовой степени полимеризации $p_w = 2300$ и поли-N-этил-4-винилпиридиний бромида (ПЭВПБ) с $p_w = 2000$ соответственно; ферменты — пероксидазу хрена ($RZ = A_{403}/A_{280} = 3,0$, Биолар, Латвия), уреазу (*Jack Beans*, активность 5 ед/мг, Sigma, США), глюкозооксидазу (*Aspergillus niger*, активность 150 ед/мг, Sigma, США). Субстратами ферментов являлись: орто-фенилендиамин; аскорбиновая кислота (Sigma, США); перекись водорода; мочевина; глюкоза (Химреактив, Россия). Иммунокомплексы и ферменты иммобилизовали на нитроцеллюлозных мембранах типа *Hybond* (Amersham, UK, размер пор 0,45 мкм) и *Millipore* (Sigma, США, размер пор 0,22 мкм). Иммобилиза-

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Европейской комиссии (Грант INCO-Copernicus, проект N PL 979112).

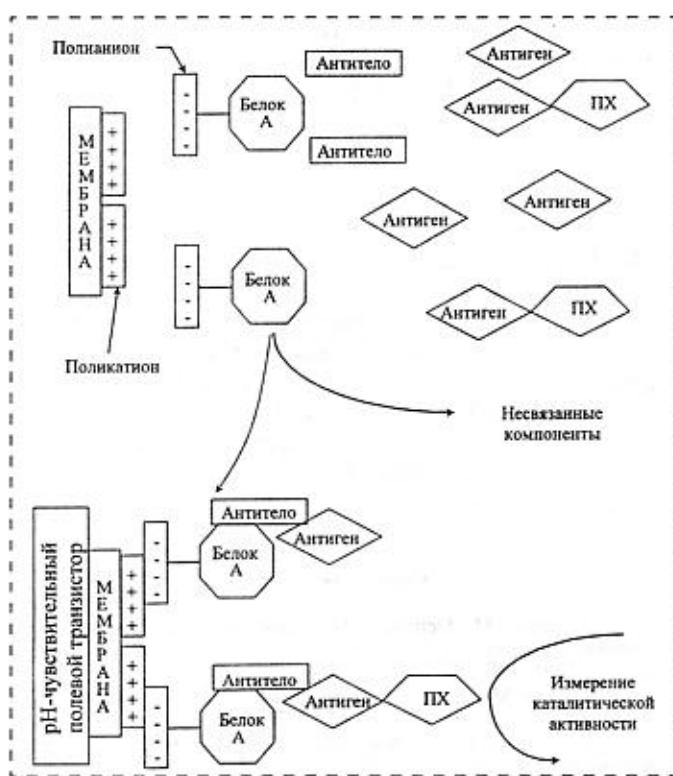


Рис. 1. Схема анализа тестостерона. В качестве поликариона использовали поли-*N*-этил-4-винилпиридиний бромид, в качестве полианиона — полиметакриловую кислоту. Ферментом-маркером являлась пероксидаза хрена. Рецепторный элемент сенсора готовили отдельно от преобразователя и затем помещали на его поверхность (рН-чувствительный полевой транзистор)

цию ферментов осуществляли погружением мембраны в раствор фермента на 20 мин и последующей отмыткой с помощью буфера.

В качестве преобразователя сенсора использовали рН-чувствительный полевой транзистор (Санкт-Петербург, Россия). Измерения проводили в кювете емкостью 2 мл при температуре 20 °C и постоянном перемешивании раствора. В качестве измерительной среды использовали одномиллиомолярный калий-fosфатный буфер, содержащий 18 ммолей NaCl, pH 6,4. Измеряемым параметром являлась максимальная скорость изменения выходного сигнала биосенсора (рН/c) при введении субстратов фермента.

Формирование рецепторного элемента сенсора проводилось согласно [8, 10] и включало две основные стадии: 1) конкурентную иммунореакцию в гомогенных условиях; 2) разделение иммунокомпонентов за счет полизелектролитных взаимодействий и формирование на полимерной мемbrane иммунокомплексов. Схема анализа тестостерона показана на рис. 1.

Результаты и обсуждение

Выбор матрицы и фермента-маркера. Для потенциометрических иммуносенсоров на основе рН-чувствительных полевых транзисторов необхо-

димо, чтобы выбранный фермент-метка обеспечивал значительный сдвиг pH в ходе реакции и имел высокую начальную скорость переработки субстрата. Для выбора наиболее эффективного фермента провели сравнительную оценку активности пероксидазы хрена (ПХ), глюкозооксидазы (ГОД) и уреазы, наиболее часто используемых в иммуноферментном анализе [1, 11–14]. Начальные скорости реакций для трех ферментов, иммобилизованных на мембранных двух типов, показаны в таблице. Несмотря на то, что начальные скорости реакций для мембран Millipore всех ферментов выше, чем при использовании мембраны Hybond, необходимая для иммуноанализа плотность иммунокомпонентов создавалась только на мембране Hybond (для сравнения — аналитические сигналы, получаемые от иммунокомплексов, иммобилизованных на мембранных типа Millipore, не превышали 10 % от сигналов, регистрируемых при использовании мембран Hybond). Поэтому в дальнейших экспериментах были использованы мембранны Hybond.

На рис. 2 показаны зависимости сигналов сенсора от концентрации ферментов для мембраны Hybond. Минимальная определяемая концентрация ПХ составляла 10^{-14} моль, в то время как для уреазы — 10^{-7} моль, а для ГОД — 10^{-6} моль (указаны концентрации ферментов в растворах, в

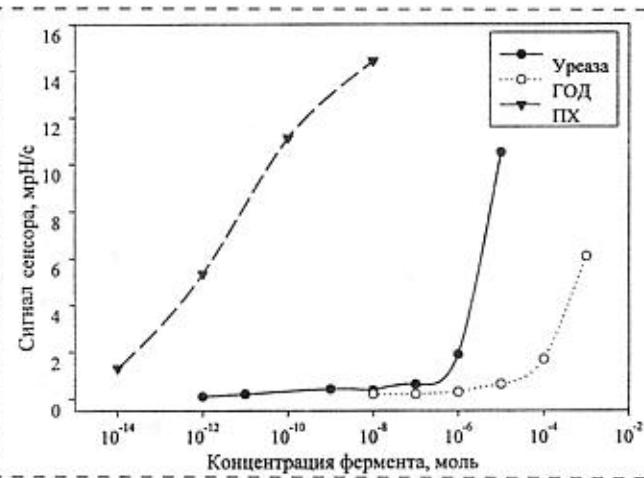


Рис. 2. Зависимость сигналов сенсора от концентрации ферментов. Ось X — концентрация (в молях) пероксидазы хрена, глюкозооксидазы и уреазы в растворах ферментов для иммобилизации (использована мембра типа Hybond), ось Y — сигнал сенсора — максимальная скорость изменения сигнала (мрН/c)

которых осуществлялась иммобилизация белка на мембрану).

Таким образом, при создании модели сенсора для детекции тестостерона были использованы мембранны Hybond и ПХ (ферментная метка) как наиболее эффективное сочетание.

Иммуноанализ тестостерона. На рис. 3 показана полученная калибровочная зависимость для определения тестостерона.

Конкурентная схема анализа предполагает уменьшение сигнала сенсора при увеличении концентрации анализируемого антигена. Рабочий диапазон концентраций составил 3–300 нг/мл при ошибке измерения, не превышающей 10 %. Использование полиэлектролитных взаимодействий для разделения иммунокомпонентов позволило сократить время анализа до 25–30 мин. Это связано с тем, что заряженные полимеры, благодаря высокой кооперативности электростатического взаимодействия и комплементарному расположению, связываются между собой с очень высокой скоростью. Поэтому при использовании коньюгатов иммунореагента с полиэлектролитом (полианионом или поликатионом) введение в реакционную систему противоиона приводит к быстрому образованию комплексов "полианион–поликатион", а если один из полимеров иммобилизован на носителе, происходит разделение сформировавшихся в ходе аналитической реакции иммунных комплексов и не прореагировавших молекул.

Таким образом, время анализа сокращается в 2–3 раза по сравнению с традиционными схемами иммуноферментного анализа [8–10]. Кроме того, формирование рецептора отдельно от преобразователя позволяет избежать длительной процедуры регенерации поверхности сенсора, необходимой

при формировании иммуномембранны непосредственно на поверхности транзистора, как это было представлено в [15–17].

* * *

В заключение отметим, что по чувствительности иммуносенсор сравним с известными методами ИФА, а предложенный подход для разделения иммунокомпонентов позволяет сократить время анализа до 30 мин и проводить измерения, не используя сложное оборудование и не привлекая высококвалифицированный обслуживающий персонал. Таким образом, представленную модель иммуносенсора можно рассматривать как прототип промышленного анализатора для определения горючего тестостерона.

Список литературы

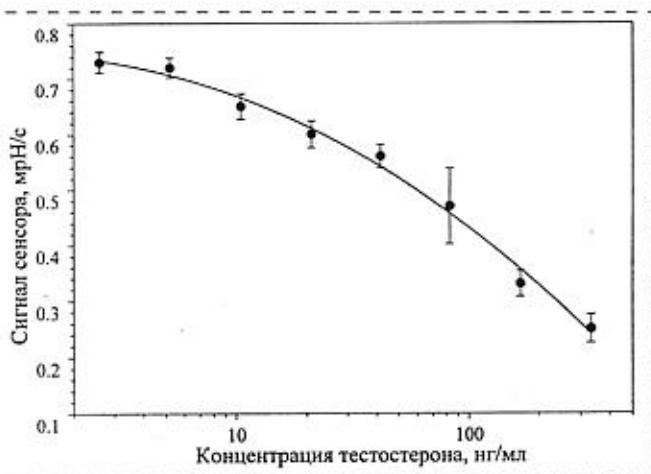


Рис. 3. Калибровочная зависимость сигналов иммуносенсора от концентрации тестостерона. Ось X — концентрация тестостерона в анализируемом образце (нг/мл), ось Y — максимальная скорость изменения сигнала сенсора (мРН/с). Показаны средние значения для трех повторов и значения ошибки измерения, представленное как стандартное отклонение

- Егоров А. М., Осинов А. П., Дзантев Б. Б., Гаврилова Е. М. Теория и практика иммуноферментного анализа. М.: Высшая школа, 1991. 288 с.
- Тертоу М., Бангхем Д. Р., Колкотт К. А. Новые методы иммуноанализа: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 280 с.
- Schasfoort R. B., Kooyman R. P., Bergveld P., Greve J. A new approach to immunoFET operation // Biosensors and Bioelectronics, 1990, 5(2). P. 103–124.
- Munoz J., Jimenez C., Bratov A. et al. Photosensitive polyurethanes applied to the development of CHEMFET and ENFET devices for biomedical sensing // Biosensors and Bioelectronics, 1997, 12 (7). P. 577–585.
- Gotoh M., Suzuki M., Kubo I. et al. Immuno-FET sensor. // Journal of Molecular Catalysis, 1989, 53. P. 285–292.
- Zhong L., Han J., Li G. et al. Miniature urea sensor based on H(⁺)-ion sensitive field effect transistor and its application in clinical analysis. // Chinese Journal of Biotechnology, 1992, 8(1). P. 57–65.
- Offenhausser A., Sprossler C., Matsuzawa M., Knoll W. Field-effect transistor array for monitoring electrical activity from mammalian neurons in culture // Biosensors and Bioelectronics, 1997, 12(8). P. 819–826.
- Yazynina E. V., Zherdev A. V., Dzantiev B. B. et al. Immunoassay techniques for detection of the herbicide simazine based on use of oppositely charged water-soluble polyelectrolytes. // Analytical Chemistry, 1999, 71 (16). P. 3538–3543.
- Yazynina E. V., Zherdev A. V., Dzantiev B. B. et al. Microplate immunoassay technique using polyelectrolyte carriers: Kinetic studies and application to detection of the herbicide atrazine. // Analytica Chimica Acta, 1999, 399 (1–2). P. 151–160.
- Dzantiev B. B., Choi M. J., Park J. et al. A new visual enzyme immunoassay of methamphetamine using linear water-soluble polyelectrolytes. // Immunology Letters, 1994, 41. P. 205–211.
- Meyerhoff M. E., Rechnitz G. A. Electrode-Based Enzyme Immunoassays using urease conjugates // Methods of Enzymology, 1980, 70 (A). P. 439–454.
- Santandreu M., Sole S., Fabregas E., Alegret S. Development of electrochemical immunosensing systems with renewable surfaces // Biosensors and Bioelectronics, 1998, 13 (1). P. 7–17.
- Papkovsky D. B., O'Riordan T. C., Guilbault G. G. An immunoassay based on the glucose oxidase label and optical oxygen detection // Analytical Chemistry, 1999, 71 (8). P. 1568–1573.
- Claycomb R. W., Delwiche M. J., Munro C. J., Bon Duran R. H. Rapid enzyme immunoassay for measurement of bovine progesterone // Biosensors and Bioelectronics, 1998, 13 (11). P. 1165–1171.
- Gotoh M., Suzuki M., Kubo I. et al. Immuno-FET sensor. // Journal of Molecular Catalysis, 1989, 53 (3). P. 285–292.
- Colapichioni C., Barbaro A., Porcelli F., Giannini I. Immunoenzymatic assay using CHEMFET devices // Sensors and Actuators B, 1991, 4 (3/4). P. 245–250.
- Стародуб В. М. Новый тип электрохимического иммуносенсора, основанный на ион-селективном полевом транзисторе // Украинский биохимический журнал, 1999, 71 (4). С. 120–123.

РФФИ СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в №1–7, 2001 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rsb.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Комплексы ДНК и синтетических полинуклеотидов с катионными амфи菲尔ными молекулами: структура, термодинамические и динамические свойства

Номер проекта 97-03-32681-а
Год представления отчета: 1997

Методами микрокалориметрии, УФ- и КД-спектроскопии, спинового и флюоресцентного зонда в работе получены новые данные, необходимые для понимания физико-химических принципов, определяющих структуру и свойства полизлектролитных комплексов нукleinовых кислот с катионными амфи菲尔ами. Нами установлено существование двух типов растворимых комплексов катионного амфи菲尔а с ДНК в области концентраций амфи菲尔а, предшествующей критической концентрации образования мицеллы (ККМ) в отсутствие ДНК, и кластерное связывание катионных амфи菲尔ов фосфатными группами полинуклеотидной цепи. Показано, что отношение ККМ катионного амфи菲尔а в отсутствие ДНК и ККМ амфи菲尔а в комплексе с ДНК возрастает с уменьшением длины углеводородной цепи амфи菲尔а и при замене в его аммонием фрагменте водородов на метильные группы. Этот результат следует из данных по полизлектролитным комплексам нативной ДНК с додециламином, додецилтриметиламмонием и цетилтриметиламмонием. Обнаружено, что изотерма комплексообразования такого типичного катионного амфи菲尔а, как цетилтриметиламмоний и его ККМ, не зависит от конформационного состояния ДНК, гибкости, длины и нуклеотидного состава полинуклеотидной цепи. Установлено, что алифатический амин и его N-триметилпроизводное при образовании полизлектролитного комплекса с ДНК по-разному влияют на структуру и стабильность двойной спирали. Проведены эксперименты, показывающие, как обнаруженный нами на растворах ДНК эффект противоположного действия алифатического амина и его N-триметилпроизводного на структуру и стабильность двойной спирали влияет на жизнеспособность клеток. Из экспериментов следует, что инактивирующее действие алифатического амина на клетку связано не только с нарушением структуры мембранны, но и ДНК.

Высокочастотные свойства фрактальных систем

Номер проекта: 97-02-18397-а
Год представления отчета: 1997

Изучено распределение высокочастотного электрического поля в композите, содержащем материалы с ма-

лыми локальными потерями. Рассматривалась двумерная двухфазная система, известная наличием глобальных потерь при низкой скорости локальных потерь. Найдены второй и более высокие моменты электрического поля и его модуля и показано, что последние расходятся в пределе малых локальных потерь и что корреляционный радиус в этом пределе также расходится, что вследствие этого в большой системе может не происходить установления эффективной диэлектрической проницаемости.

Проблема установления высокочастотной эффективной диэлектрической проницаемости изучена на примере модели иерархически построенной слоистой среды. Найдено точное решение для элементов тензора диэлектрических проницаемостей на n -м этапе итерации. Показано, что в высокочастотном случае, в отличие от статического, в отсутствие поглощения не происходит как установления эффективной диэлектрической проницаемости, так и изотропизации тензора. Найдена частотная зависимость диэлектрической проницаемости двумерной среды, построенной из двух различных металлов. Показано, что она представляет собой периодическую функцию частоты, пики которой отвечают плазмонным модам.

Проблема распределения высокочастотного поля исследована также на примере свойств иерархически построенных цепочек импедансов. Исследован спектр нулей и полюсов импеданса большой системы и доказан его фрактальный характер.

Изучен фотогальванический эффект в случайно-оптически-неоднородной среде с малыми локальными потерями. Показано, что наличие неоднородности высокочастотной диэлектрической проницаемости приводит к гигантскому росту эффективного фотогальванического коэффициента.

Переход Андерсона в одномерных кремниевых нитях с магнитной примесью

Номер проекта: 97-02-18507-а
Год представления отчета: 1997

Проведены исследования проводимости сплошных пленок аморфного кремния, легированных ионной имплантацией марганца, а также слоев а-SiMn, подвергнутых электролитическому травлению в растворе плавиковой кислоты (слоев пористого кремния) в интервале температур 1,5–300 К и концентраций марганца 14–2 %. Обнаружено, что при концентрации примеси больше 14 % в обеих системах реализуется переход в металлическое состояние. Однако характер металлической проводимости в сплошных и пористых слоях существенно разли-

чается. В сплошных пленках а-SiMn основной вклад в температурную зависимость проводимости и магнетосопротивление вносят эффекты электрон-электронного взаимодействия и магнитного упорядочения в состояние спинового стекла (об этом свидетельствует пик в температурной зависимости магнитной восприимчивости). В пористом кремнии обнаружено явление одномерной "слабой" локализации в кремниевых нитях, поперечный размер которых составляет 5–8 нм. Значение интерференционной поправки достигает 6,5 % в образце с максимальной концентрацией примеси. Показано, что в последнем случае магнитные корреляции становятся несущественными, а процессы неупругого рассеяния определяются электрон-электронными столкновениями с малой (много меньше kT) передачей энергии.

Изучение структурных особенностей течения на поверхностях с макрошероховатостями и управление интенсификацией теплообмена

Номер проекта: 97-02-18497-а

Год предоставления отчета: 1997

Выполнены исследования структуры течения в лунках со скругленной кромкой. Сглаживание кромки приводит к уменьшению частоты и амплитуды крупномасштабных автоколебаний, генерируемых каверной, что в свою очередь приводит к снижению теплоотдачи и в большей степени к уменьшению сопротивления. Это повышает эффективность полусферических каверн как интенсификаторов теплообмена.

Изучено влияние округления кромки щели в трубе с радиально-щелевым вдувом на поля скоростей и давлений, на характерную длину отрывной зоны, степень поджатия потока и максимальное разрежение за областью отрыва. Предложен метод расчета коэффициента сопротивления для щели со скругленной выходной кромкой.

Установлены границы перехода для средней теплоотдачи от ламинарного закона к турбулентному для поперечных траншей с прямыми и наклонными боковыми стенками. Для средних коэффициентов теплоотдачи в турбулентной области определены корреляционные зависимости.

Проведено исследование структуры потока и теплоотдачи в отрывном течении за обратным уступом и ребром переменной высоты при разных уровнях турбулентности набегающего потока — от 1,5 до 15 %. Измерены поля давлений и пульсаций вектора скорости. Установлено, что внешняя турбулизация потока приводит к значительному сокращению отрывной области на треть за ребром и на четверть за уступом при уровне турбулентности 15 %. При этом максимум теплоотдачи за ребром возрастает в 1,3 раза и за уступом в 1,45. Это свидетельствует о повышении эффективности обретения при высокой внешней турбулентности. Дополнительная интенсификация за обратными уступами достигается уменьшением угла наклона стенки примерно до 45°. Внешняя турбулентность увеличивает угол безотрывного обтекания.

Проведена отработка методики измерений трения пленочным датчиком. Получена тарировочная зависимость квадрата напряжения от касательного напряжения трения на стенке.

Исследование эффектов межэлектронного взаимодействия в туннельных переходах металл/полупроводник с трех- и двумерным электронным газом

Номер проекта: 97-02-17750-а

Год предоставления отчета: 1997

Отработана методика выделения аномалии при нулевом смещении (АНС) из фона на зависимости проводимости туннельных переходов от смещения в сравнительно сильных магнитных полях (≥ 10 Тл). Впервые определена форма АНС и ее зависимость от магнитного поля при температуре 4,2 К для туннельных переходов n -GaAs/Au. Показано, что форма АНС описывается распределением Лоренца, ширина которого меняется как $B^{1/5}$, а амплитуда — как $B^{2/5}$ (после устранения B^2 -й зависимости, обусловленной квантованием Ландау энергетического спектра электронов в полупроводнике). Эти слабые остаточные зависимости связываются с изменением формы барьера барьера Шоттки вследствие влияния магнитного квантования на обменно-корреляционное взаимодействие электронов.

Измерен фоторезистивный отклик на терагерцовое лазерное излучение туннельных переходов n -GaAs/AI с различной степенью неоднородности металлического электрода и разработана методика количественного сопоставления экспериментальных данных с теоретическим расчетом, учитывающая, что при большом значении отклика возникают значительные изменения напряжения смещения на переходе во время действия импульса излучения. Получено, что на переходах с гранулированной металлической пленкой затвора зависимость отклика от интенсивности становится сильно нелинейной и может быть описана, только если положить эффективный коэффициент усиления интенсивности порядка 10^5 . Аналогичные значения усиления сигнала наблюдаются в эффектах гигантского комбинационного рассеяния молекул, адсорбированных на шероховатой металлической поверхности, в генерации второй гармоники островковыми металлическими пленками и в ряде других явлений такого рода. Все они связываются с увеличением локальных полей из-за неоднородностей на поверхности металла. Однако природа такого усиления остается еще дискуссионной. Полученное доказательство усиления отклика с увеличением степени неоднородности металлической пленки-затвора указывает, что мы имеем еще один тип структур, на которых можно исследовать природу гигантских нелинейных откликов неоднородной поверхности металла.

Рассмотрена задача о нестационарном тепловом балансе поверхности полупроводника АЗ-В5, нагреваемой лазерным пучком за счет поглощения излучения на свободных носителях, при учете фононной и электронной теплопроводности. Решена система кинетических уравнений для электронов, оптических и акустических фононов в случае нестационарного нагрева поверхности полупроводника в геометрии растекания. Полученные формулы для зависимости температуры от частоты модуляции нагрева позволяют анализировать тепловой отклик переходов с барьером Шоттки на нагрев излучением: оценить характерное время отклика для заданных размеров металлического затвора и площади лазерного пучка, связать его с параметрами полупроводника, определить характерный масштаб длины термализации

электронов. Эти результаты важны для дискриминации отклика тепловой природы от фоторезистивного эффекта, а также могут составить основу для разработки метода, близкого к фототермической спектроскопии.

Упругие волны и баллистические фононы в монокристаллах и сверхрешетках

Номер проекта: 97-02-16338-а

Год предоставления отчета: 1997

А. Развит предложенный ранее формализм локально-го топологического заряда поляризационных сингулярностей, соответствующих вырожденным акустическим модам в кристаллах, и построена теория аналитического исчисления локального топологического заряда для продольных мод. На основе локальных характеристик обоих типов выявлены глобальные топологические инварианты среды с произвольной анизотропией, устанавливающие взаимосвязь вырожденных и продольных мод в кристалле в целом и позволяющие тем самым восстановить конфигурацию поляризационного поля исхода из значений упругих модулей среды. Проведено обобщение теории для пьезоэлектрических кристаллов. Выведены соотношения для поляризационных и энергетических свойств объемных вязкоупругих волн. Получено и исследовано негармоническое волновое решение, возникающее в поглощающих кристаллах в направлении вырождения по волновому вектору.

Б. Исследованы особенности фокусировки баллистических фононов, распространяющихся от точечного ис-

точника, в окрестности направлений устойчивого вырождения (конических точек поверхности медленности). Получено и проанализировано локальное уравнение линий нулевой кривизны поверхности медленности (изо частотной поверхности), характеризующее каустики волнового фронта. Построена классификация типов конфигураций поверхности медленности в сечении плоскостью симметрии для ромбических кристаллов. Найден необходимый и достаточный критерий, при котором участок отрицательной продольной главной кривизны, ограниченный каустическими линиями фононной фокусировки ("складками"), не охватывает ось симметрии.

В. Определены условия существования чисто сдвиговых поверхностных волн, локализующихся на механически свободной поверхности кристалла за счет его собственной вязкости. Изучены особенности отражения упругих волн от поверхности кристалла с напыленной пленкой. Установлено, что при определенных условиях наличие покрытия трансформирует сдвиговую поверхность волну в оттекающую моду. В результате взаимодействия с этой модой отражение приобретает резонансные свойства, характеризующиеся резкими изменениями в узком интервале критических значений угла падения.

Г. Решена задача о брэгговской дифракции сдвиговой упругой волны в регулярной структуре сегнетоэлектрических доменов. С помощью развитой аналитической процедуры, основанной на матричном методе, получено явное решение для спектральной зависимости коэффициента отражения (прохождения) при четырехволновом взаимодействии, обусловленном электромеханической связью. Проанализированы резонансные свойства дифракционного спектра.

ИНФОРМАЦИЯ

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ НА ЮГЕ РОССИИ

Таганрогский государственный радиотехнический университет (до 1992 г. — Таганрогский радиотехнический институт — ТРТИ) основан в 1952 г. В нем осуществляется подготовка дипломированных специалистов, бакалавров, магистров, кандидатов и докторов наук в области электроники, приборостроения, вычислительной техники, радиотехники, связи, систем управления, информатики, а также по другим перспективным направлениям. В 2001 г. общий прием на 1-й курс университета составляет 1450 человек по 52 специальностям.

С начала основания в ТРГУ ведутся исследования и разработка изделий в области микрорадиотехники. В 1957 г. при университете организуется отраслевая лаборатория микрорадиотехники. Изготовление в ТРГУ первой в стране интегральной микросхемы (1961 г.) имело большой резонанс и стимулировало развертывание работ по микрорадиотехнике как в вузах, так и в промышленности. В последующие годы в университете был выполнен ряд НИОКР по проектированию и технологии производства различных изделий микрорадиотехники, разработаны и освоены в серийном и масштабном производстве микросхемы серий 134, 584, 1029, 1077, 1509, 1515, 1815, 5503 и др. В настоящее время выполняются разработки ряда полузаказных и заказных СБИС с использованием современных интегрированных САПР. С 70-х годов ведутся разработки и освоено производство различных сенсоров и датчиков давления, ускорения, температуры, содержания веществ в газах и жидкостях и др., а также микросистем на их основе. В частности, создан комплект датчиков для самолета-амфибии БЕ-200.

В 1994—2000 гг. на базе университета проведены семь международных конференций "Актуальные проблемы твердотель-

ной электроники и микрорадиотехники". С 1999 г. в составе конференции работает секция микросистемной техники.

Подготовка специалистов по направлению "Электроника и микрорадиотехника" на факультете электроники и приборостроения (ФЭП) университета ведется с 1952 г. (специальности 200100 и 200300).

С 2001/2002 учебного года в ТРГУ лицензирована (приказ Минобразования РФ № 1840 от 25.04.2001) и открыта новая перспективная специальность 201900 — "Микросистемная техника" (направление подготовки дипломированных специалистов 654100 — "Электроника и микрорадиотехника"). Первый набор на специальность "Микросистемная техника" составляет 23 человека. Прием абитуриентов и обучения проводятся в базовом вузе в Таганроге, а также в филиалах ТРГУ в Ростове, Волгодонске, Ейске, Нальчике, Невинномысске, Пятигорске, Георгиевске, Черкесске, Геленджике, Туапсе и Элисте. Следовательно, появляется возможность подготовки специалистов по микросистемной технике в масштабах всего южного региона России.

Учебный план по специальности 201900 основан на стандарте направления 654100, базовом плане, разработанном в С-ПБГЭТУ (Лучинин В. В., Таиров Ю. М. К вопросу об организации подготовки инженерных кадров по специальности "Микросистемная техника" // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 3—6) и включает дисциплины специализации университета "Датчики и сенсорные микросистемы". При разработке учебного плана и программ учебных дисциплин использовались также материалы европейских организаций NEXUS [URL: <http://nexus-emst.com/>], EUPRAXIS [URL: <http://eupraxis.com/>] и TIMA [URL: <http://tima.imag.fr/>], с которыми ФЭП ТРГУ имеет связи.

В. Г. Захаревич, д-р техн. наук, проф.,

Б. Г. Коноплев, д-р техн. наук, проф.,

Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТРГУ)

электронов. Эти результаты важны для дискриминации отклика тепловой природы от фоторезистивного эффекта, а также могут составить основу для разработки метода, близкого к фототермической спектроскопии.

Упругие волны и баллистические фононы в монокристаллах и сверхрешетках

Номер проекта: 97-02-16338-а

Год предоставления отчета: 1997

А. Развит предложенный ранее формализм локально-го топологического заряда поляризационных сингулярностей, соответствующих вырожденным акустическим модам в кристаллах, и построена теория аналитического исчисления локального топологического заряда для продольных мод. На основе локальных характеристик обоих типов выявлены глобальные топологические инварианты среды с произвольной анизотропией, устанавливающие взаимосвязь вырожденных и продольных мод в кристалле в целом и позволяющие тем самым восстановить конфигурацию поляризационного поля исхода из значений упругих модулей среды. Проведено обобщение теории для пьезоэлектрических кристаллов. Выведены соотношения для поляризационных и энергетических свойств объемных вязкоупругих волн. Получено и исследовано негармоническое волновое решение, возникающее в поглощающих кристаллах в направлении вырождения по волновому вектору.

Б. Исследованы особенности фокусировки баллистических фононов, распространяющихся от точечного ис-

точника, в окрестности направлений устойчивого вырождения (конических точек поверхности медленности). Получено и проанализировано локальное уравнение линий нулевой кривизны поверхности медленности (изо частотной поверхности), характеризующее каустики волнового фронта. Построена классификация типов конфигураций поверхности медленности в сечении плоскостью симметрии для ромбических кристаллов. Найден необходимый и достаточный критерий, при котором участок отрицательной продольной главной кривизны, ограниченный каустическими линиями фононной фокусировки ("складками"), не охватывает ось симметрии.

В. Определены условия существования чисто сдвиговых поверхностных волн, локализующихся на механически свободной поверхности кристалла за счет его собственной вязкости. Изучены особенности отражения упругих волн от поверхности кристалла с напыленной пленкой. Установлено, что при определенных условиях наличие покрытия трансформирует сдвиговую поверхность волну в оттекающую моду. В результате взаимодействия с этой модой отражение приобретает резонансные свойства, характеризующиеся резкими изменениями в узком интервале критических значений угла падения.

Г. Решена задача о брэгговской дифракции сдвиговой упругой волны в регулярной структуре сегнетоэлектрических доменов. С помощью развитой аналитической процедуры, основанной на матричном методе, получено явное решение для спектральной зависимости коэффициента отражения (прохождения) при четырехволновом взаимодействии, обусловленном электромеханической связью. Проанализированы резонансные свойства дифракционного спектра.

ИНФОРМАЦИЯ

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ НА ЮГЕ РОССИИ

Таганрогский государственный радиотехнический университет (до 1992 г. — Таганрогский радиотехнический институт — ТРТИ) основан в 1952 г. В нем осуществляется подготовка дипломированных специалистов, бакалавров, магистров, кандидатов и докторов наук в области электроники, приборостроения, вычислительной техники, радиотехники, связи, систем управления, информатики, а также по другим перспективным направлениям. В 2001 г. общий прием на 1-й курс университета составляет 1450 человек по 52 специальностям.

С начала основания в ТРГУ ведутся исследования и разработка изделий в области микрорадиотехники. В 1957 г. при университете организуется отраслевая лаборатория микрорадиотехники. Изготовление в ТРГУ первой в стране интегральной микросхемы (1961 г.) имело большой резонанс и стимулировало развертывание работ по микрорадиотехнике как в вузах, так и в промышленности. В последующие годы в университете был выполнен ряд НИОКР по проектированию и технологии производства различных изделий микрорадиотехники, разработаны и освоены в серийном и масштабном производстве микросхемы серий 134, 584, 1029, 1077, 1509, 1515, 1815, 5503 и др. В настоящее время выполняются разработки ряда полузаказных и заказных СБИС с использованием современных интегрированных САПР. С 70-х годов ведутся разработки и освоено производство различных сенсоров и датчиков давления, ускорения, температуры, содержания веществ в газах и жидкостях и др., а также микросистем на их основе. В частности, создан комплект датчиков для самолета-амфибии БЕ-200.

В 1994—2000 гг. на базе университета проведены семь международных конференций "Актуальные проблемы твердотель-

ной электроники и микрорадиотехники". С 1999 г. в составе конференции работает секция микросистемной техники.

Подготовка специалистов по направлению "Электроника и микрорадиотехника" на факультете электроники и приборостроения (ФЭП) университета ведется с 1952 г. (специальности 200100 и 200300).

С 2001/2002 учебного года в ТРГУ лицензирована (приказ Минобразования РФ № 1840 от 25.04.2001) и открыта новая перспективная специальность 201900 — "Микросистемная техника" (направление подготовки дипломированных специалистов 654100 — "Электроника и микрорадиотехника"). Первый набор на специальность "Микросистемная техника" составляет 23 человека. Прием абитуриентов и обучения проводятся в базовом вузе в Таганроге, а также в филиалах ТРГУ в Ростове, Волгодонске, Ейске, Нальчике, Невинномысске, Пятигорске, Георгиевске, Черкесске, Геленджике, Туапсе и Элисте. Следовательно, появляется возможность подготовки специалистов по микросистемной технике в масштабах всего южного региона России.

Учебный план по специальности 201900 основан на стандарте направления 654100, базовом плане, разработанном в С-ПБГЭТУ (Лучинин В. В., Таиров Ю. М. К вопросу об организации подготовки инженерных кадров по специальности "Микросистемная техника" // Микросистемная техника. 2000. № 2. С. 3—6) и включает дисциплины специализации университета "Датчики и сенсорные микросистемы". При разработке учебного плана и программ учебных дисциплин использовались также материалы европейских организаций NEXUS [URL: <http://nexus-emst.com/>], EUPRAXIS [URL: <http://eupraxis.com/>] и TIMA [URL: <http://tima.imag.fr/>], с которыми ФЭП ТРГУ имеет связи.

В. Г. Захаревич, д-р техн. наук, проф.,

Б. Г. Коноплев, д-р техн. наук, проф.,

Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТРГУ)