

Е. А. АЛЕЙНИКОВ, к. т. н. Е. Я. БАДИНТЕР,
к. ф.-м. н. А. М. ИОЙШЕР, Н. И. ЛЕПОРДА, А. Т. РЫБАЛКА

Республика Молдова, г. Кишинев, Институт ELIRI s. a.; Лаборатория LISES
Email: ioisher@eliri.md

Дата поступления в редакцию
28.09 2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. И. КЛИМОВСКАЯ
(ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ МИКРОДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ НА БАЗЕ ГЕРМАНИЕВОВОГО МИКРОПРОВОДА

Создан гальваномагниторекомбинационный микродатчик на базе германиевого микропровода. Рассмотрена возможность использования таких микродатчиков в качестве датчиков положения.

Во многих современных устройствах контроля положения и больших перемещений требуются чувствительные элементы минимальных размеров. Это позволяет повысить точность определения координат объекта на плоскости. В частности, такие измерения актуальны при невозможности (или нежелательности) использования оптических методов контроля положения объекта, например в пыльном помещении производственного цеха.

Аналогичная задача определения координат объекта внутри организма человека или животного (для относительно небольших перемещений зонда — менее 1 м) актуальна в области биомедицинских исследований.

Наиболее распространенный способ реализации координатно-измерительных устройств для описанных систем основан на так называемом электромагнитном амплитудном методе, который включает создание в зоне контроля неоднородного по амплитуде переменного магнитного поля на базе независимых или взаимодействующих своими магнитными полями источников [1]. При этом в различных направлениях, например взаимно перпендикулярных, напряженность поля обычно различается по частоте.

Одним из перспективных путей миниатюризации считывающих датчиков магнитного поля является использование гальваномагнитных датчиков [2]. В настоящей работе предлагается конструкция гальвано-

магниторекомбинационного (ГМР) микродатчика на базе литого германиевого микропровода [3], позволяющего обеспечить поперечные размеры чувствительных элементов (ГМР-элементов), входящих в его состав, не более 100 мкм.

Обычно полупроводниковые ГМР-элементы изготавливают из кристаллов, у которых на двух противоположных гранях создают различную скорость поверхностной рекомбинации (СПР). При этом диффузионная длина D неосновных носителей заряда (ННЗ) должна быть соизмерима с расстоянием между указанными гранями, т. к. именно тогда ГМР-эффект проявляется лучше всего. Классический материал для таких элементов — низколегированный германий с проводимостью n -типа, у которого D достигает сотен микрон.

Проведенные исследования показали, что в литом микропроводе (МП) из Ge(Sb) с удельным сопротивлением ρ от 10 до 50 мОм·м длина диффузионного смещения λ_d составляет от 50 до 150 мкм. Разработана серийно-пригодная технология изготовления германиевого микропровода с такими диаметрами жилы. При его использовании исключается необходимость в резке и шлифовке массивных кристаллов и в ряде других технологических операций. Стеклоплавная изоляция удаляется в концентрированной плавиковой кислоте, которая растворяет стекло, не взаимодействуя с германием.

Исходный германиевый МП получают литьем из жидкой фазы в атмосфере аргона (метод Улитовского). Технология литья МП в стеклянной изоляции известна [4, с. 6—9] и сводится к следующему (рис. 1).

В запаянную с одного конца стеклянную трубку помещают навеску жирообразующего материала



Рис. 1. Получение литого микропровода в стеклянной изоляции из жидкой фазы металлов и сплавов по методу Улитовского капельным (а) и непрерывным (б) способами

(ЖМ), закрепляют эту трубку в подающем механизме так, чтобы ее конец с ЖМ находился в рабочей зоне высокочастотного (ВЧ) индуктора. Под действием электромагнитного поля ВЧ-индуктора навеска разогревается и расплавляется, образуя раскаленную каплю. Конец стеклянной трубки при этом размягчается за счет теплопроводности и стекло обволакивает каплю ЖМ, образуя вместе с ней микрованну. Капля не прорывает стеклянную оболочку микрованны, т. к. за счет пондеромоторных сил ВЧ-поля она удерживается во взвешенном состоянии над индуктором. Из микрованны путем намотки на бобину приемного механизма вытягивают стеклянный капилляр, который непрерывно заполняется расплавом из капли. В результате остывания под индуктором расплав кристаллизуется, образуя жилу формирующегося таким образом литого МП, а стеклянная оболочка капилляра затвердевает, образуя его изоляцию.

На геометрические и электрофизические параметры МП влияет целый комплекс технологических параметров и физических свойств исходных материалов, описанный в [3]. Отметим только, что данная технология без особых усложнений позволяет получить МП с диаметром жилы от 5 до 40 мкм.

Однако при литье МП из полупроводниковых материалов следует обеспечить выполнение ряда специфических требований. В частности, для защиты микрованны от диффузии кислорода установка литья снабжена дополнительными приспособлениями, благодаря которым микрованна обдувается разогретым аргоном высокой чистоты как изнутри трубки, так и снаружи. Кроме того, из-за высокого удельного сопротивления многих полупроводников (в том числе собственно Ge и слаболегированного Ge) навеска ЖМ оказывается прозрачной для электромагнитного поля индуктора и не разогревается самостоятельно в этом поле. Поэтому требуется начальный нагрев навески (для Ge — до 200—250°C), пока не станет возможным ее самостоятельный разогрев и расплавление в индукторе на рабочих частотах 440 или 880 кГц. Для такого разогрева используется излучение кольца из силицированного графита, раскаленного в поле индуктора, либо обдув микрованны разогретым аргоном.

Получение МП диаметром до 150 мкм также потребовало некоторой модернизации существующего оборудования. В результате нами была разработана технология литья микропровода из Ge, пригодная для промышленного производства, хотя доработка оборудования еще продолжается.

Из-за того что в используемых стеклянных трубках имеются микродефекты (непровары, свилю и т. д.), а также растворенный кислород, избежать полностью дополнительного легирования микрованны при литье МП не удастся. Кроме того, из-за сегрегации примесей на фронте кристаллизации жилы и параболической формы этого фронта при литье с высокой скоростью концентрация легирующих примесей в приповерхностном слое жилы, т. е. на границе со стеклом, существенно выше, чем в центральной ее части. Поэтому технология изготовления ГМР-элементов предусматривает, помимо удаления у исходного

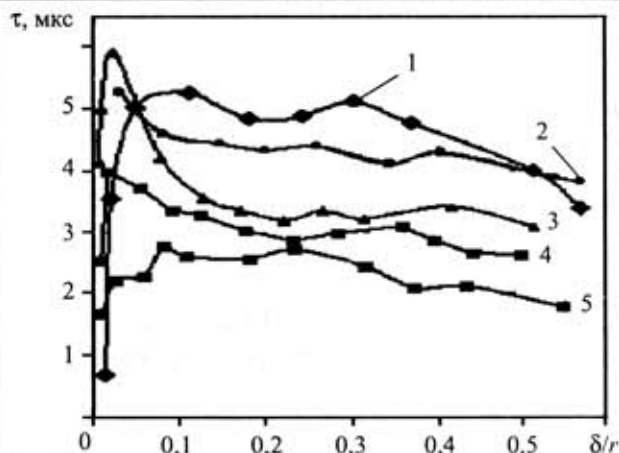


Рис. 2. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда (τ) от толщины удаленного поверхностного слоя нити германия (δ), отнесенной к радиусу нити (r), для различных модификаций Ge:
1 — p -Ge(B), $\rho=6,0$ мОм·м, $2r=145$ мкм;
2 — p -Ge(In), $\rho=4,5$ мОм·м, $2r=120$ мкм;
3 — n -Ge(Sb), $\rho=7,1$ мОм·м, $2r=108$ мкм;
4 — n -Ge(As), $\rho=6,4$ мОм·м, $2r=132$ мкм;
5 — p -Ge(Ga), $\rho=7,2$ мОм·м, $2r=110$ мкм

МП стеклянной изоляции, также удаление из цилиндрической нити Ge поверхностного слоя толщиной 0,05—0,1 от ее диаметра. При этом возрастает также время жизни неосновных носителей заряда (рис. 2) и, соответственно, диффузионная длина. В общем случае в получаемых нитях германия, как уже упомянуто выше, она лежит в пределах от 50 до 150 мкм.

Для обеспечения существенного ГМР-эффекта в германиевой нити требуется прежде всего добиться низкой скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Для этого использовался полирующий травитель состава $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (в объемном соотношении 3:2:1) с последующей промывкой заготовки в смеси этилового спирта и ацетона высшей очистки.

Исследована зависимость минимальной СПР от удельной электропроводности нитей (рис. 3). Как видно из рисунка, с ростом σ , т. е. с уменьшением ρ , СПР возрастает. Значения СПР (порядка 3 м/с) достигаются при $\sigma < 50$ Ом⁻¹·м⁻¹ ($\rho > 0,02$ Ом·м). Минимальная СПР составляет 2,5 м/с. Область с высокой СПР (80...100 м/с) реализуется на части боковой поверхности путем механической обработки (шлифовки). Такая разность СПР вполне достаточна для реализации ГМР-микродатчиков на базе микропровода из Ge.

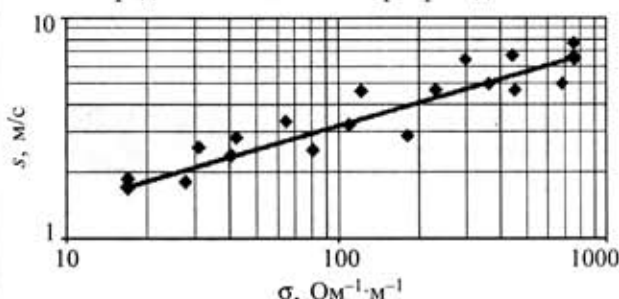


Рис. 3. Зависимость скорости поверхностной рекомбинации s микропровода из n -Ge от удельной электропроводности σ

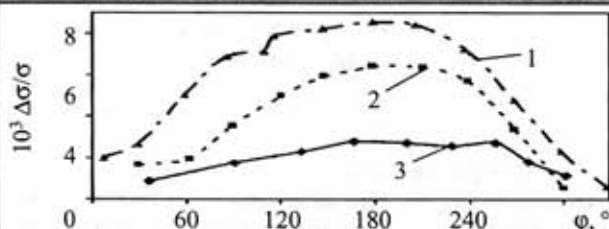


Рис. 4. Зависимость ГМР-эффекта в литом микропроводе из Ge от угловых размеров области с высокой скоростью поверхностной рекомбинации:

1 — $\sigma=71 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; 2 — $\sigma=48 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; 3 — $\sigma=36 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость ГМР-эффекта (относительного изменения удельной электропроводности $\Delta\sigma/\sigma$) от угловых размеров области с высокой СПР для образцов с различной электропроводностью σ в магнитном поле $H=2400 \text{ А/м}$. Как видно из рисунка, максимальная чувствительность наблюдается, когда область с высокой СПР ограничена в сечении МП центральным углом $\varphi=180^\circ$. Однако основной вклад в ГМР-эффект вносит область с $\varphi=120^\circ$.

На рис. 5 представлена зависимость относительного изменения удельной электропроводности σ германиевой нити от ее диаметра при ГМР-эффекте в магнитном поле с индукцией B_z , перпендикулярном оси нити, и электрическом поле внутри нити вдоль ее длины $E_x=U/L$, где U — напряжение на образце, а L — его длина. Эта зависимость носит сложный характер и имеет вид кривой с максимумом в области значений $2r=1,2\lambda_d$.

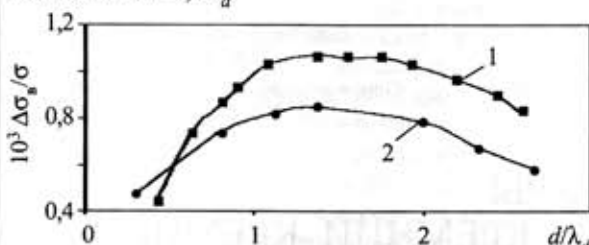


Рис. 5. Зависимость ГМР-эффекта от диаметра нитей из Ge:

1 — $\rho=29 \text{ мОм}\cdot\text{м}$, $d=280 \text{ мкм}$, $\lambda_d=110 \text{ мкм}$, $E_x B_z=10,5 \text{ В}\cdot\text{Тл/м}$; 2 — $\rho=16 \text{ мОм}\cdot\text{м}$, $d=265 \text{ мкм}$, $\lambda_d=99 \text{ мкм}$, $E_x B_z=14,2 \text{ В}\cdot\text{Тл/м}$

Исходя из электрофизических параметров микропровода выбирался соответствующий диаметр жилы. При необходимости германиевая нить утонялась травлением в перекиси водорода.

Конструкция микродатчика представляет собой два отрезка микропровода без стеклянной изоляции диаметром $80\text{—}120 \text{ мкм}$ и длиной $2,2 \text{ мм}$, размещенных на миниатюрной керамической или стеклотекстолитовой подложке (микроплате) параллельно друг другу на расстоянии между осями $0,4 \text{ мм}$ (рис. 6), образуя таким образом два чувствительных ГМР-элемента в одном микродатчике. Размеры подложки $1,8\times 0,6\times 0,25 \text{ мм}$. Она содержит необходимые контактные площадки и дорожки.

У каждой из германиевых нитей на полуцилиндрических частях их боковых поверхностей созданы области с высокой и низкой скоростями поверхностной рекомбинации. Кроме того, на торцах нитей сформированы омические контакты, которыми они припаяны к соответствующим площадкам микроплаты.

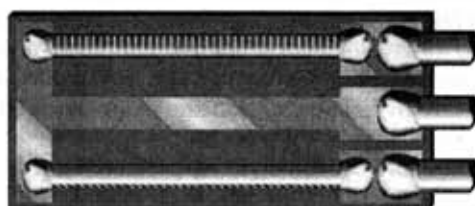


Рис. 6. Конструкция ГМР-микродатчика из Ge-микропровода

Сборка микродатчика осуществляется на программируемых установках посадки и сварки кристаллов. При этом обеспечивается размещение нитей Ge на микроплате с максимальной чувствительностью для взаимно перпендикулярных направлений магнитного поля. Три токовывода, один из которых у элементов общий, имеют диаметры с изоляцией $0,12 \text{ мм}$. Микроплата с закрепленными на ней элементами обеспечена защитным покрытием.

Микродатчик питается постоянным током до 2 мА . В переменном магнитном поле его выходным сигналом служит переменное напряжение U_c , не зависящее от частоты в диапазоне от 20 Гц до 50 кГц . Вольтовая чувствительность такого ГМР-микродатчика при токе питания $1,5 \text{ мА}$ составляет $5\text{—}10 \text{ мВ/мТл}$, т. е. $6\text{—}12 \text{ мкВ/(А/м)}$ для каждого из двух его элементов в направлении максимальной чувствительности. Рабочий диапазон магнитных полей, при которых относительная приведенная погрешность нелинейности рабочей характеристики ГМР-элемента $U_c=f(H)$ не превышает $0,2\%$, лежит в пределах $0\text{—}20 \text{ кА/м}$.

На рис. 7 представлена зависимость вольтовой чувствительности γ от температуры окружающей среды T_c (при токе питания $1,5 \text{ мА}$). Температурная погрешность датчиков из германия является одним из их слабых мест. Для микродатчиков из микропровода она составляет $0,1\text{—}0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. В случае использования таких микродатчиков для интроскопии в медицине и биологии, где температура окружающей среды изменяется незначительно, ею можно пренебречь. В случае же их использования в производственных помещениях система обработки данных, получаемых с таких микродатчиков, должна учитывать температурную погрешность, если это необходимо для получения высоких метрологических характеристик процесса контроля положения.

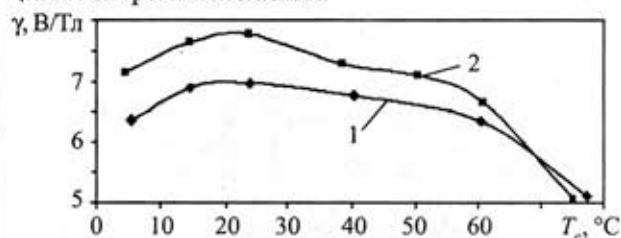


Рис. 7. Зависимость чувствительности ГМР-преобразователей из германиевого микропровода от температуры окружающей среды:

1 — $\rho=0,031 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 2 — $\rho=0,036 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

Использование описанного микродатчика для целей определения координат требует создания комплекса магнитных полей с заданными градиентами в двух или трех взаимно перпендикулярных направлениях.

ях, причем направления напряженности самого магнитного поля зачастую можно ограничить двумя направлениями. Рабочая частота поля каждого из направлений по градиенту должна отличаться друг от друга, желательно, в 2 раза и более.

Эта сама по себе довольно сложная задача в данной работе не проводилась и не рассматривалась. Однако для оценки возможности применения ГМР-микродатчиков нами была изготовлена упрощенная модель магнитной системы, состоящая из несимметричных по числу витков колец специального типа и геометрии, оси которых размещены перпендикулярно друг другу. Питание колец осуществляется синусоидальным напряжением от генератора звуковой частоты через усилитель, обеспечивающий силу тока до 20 А. Создаваемая максимальная напряженность магнитного поля в рабочей зоне с определяющим размером до 1 м составляет 3000 А/м при градиенте 1800 А/м². Рабочие частоты регулируются в диапазоне от 20 до 1000 Гц. Снимаемые с каждого из чувствительных элементов сигналы обеспечивают чувствительность 25 мкВ/мм на любой рабочей частоте.

Для реализации системы контроля положения выходные сигналы датчиков обрабатываются по специальной программе, учитывающей распределение в пространстве напряженностей магнитных полей раз-

ной заданной частоты, чувствительность элементов, составляющих ГМР-микродатчик и их размещение на микроплате.

Таким образом, показана возможность применения гальваномагниторекомбинационных микродатчиков с двумя чувствительными элементами на базе литого микропровода для использования в устройствах контроля положения объекта. Благодаря высокой чувствительности к переменным магнитным полям, малым размерам и, соответственно, высокой разрешающей способности представляется перспективным использование таких микродатчиков в биомедицинских исследованиях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонович Э. Н., Жевелев Б. Я. Расчет и проектирование электромагнитных координатно-измерительных устройств. — Минск: Наука и техника, 1989.
2. Ioisher A., Kantser V., Leporda N. Magneto-sensors based on semiconductor microwires // Sensors and Actuators. — 1996. — Vol. A 59. — P. 119—123.
3. Иойшер А., Котрубенко Б. Полупроводниковые и полуметаллические микропровода. — Кишинев: Штиинца, 1987.
4. Бадинтер Е., Берман Н., Драбенко И. и др. Литой микропровод и его свойства. — Кишинев: Штиинца, 1973.

К. т. н. И. В. БЕЛОУСОВ, д. ф.-м. н. Е. В. БУЗАНЕВА,
д. ф.-м. н. Г. В. КУЗНЕЦОВ

Украина, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко
E-mail: kuznetsov@uninet.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
25.07 2005 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Н. МАКСИМЕНКО
(ЗАО "Укрналит", г. Киев)

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ «СИЛИЦИД КОБАЛЬТА–ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ–КРЕМНИЙ»

Предложена технология формирования сетки металлического электрода на основе силицида кобальта для газочувствительных поверхностно-барьерных кремниевых структур — элементов газовых датчиков.

Комбинация в пористом кремнии его кристаллической структуры и значительной удельной площади поверхности (200—500 м²/см³) определяют интерес к использованию его в газовых сенсорах [1—3]. Одной из задач разработки сенсорных структур типа «металл—пористый кремний—кремний» является создание эффективного металлического электрода, обеспечивающего свободное проникновение молекул газа к поверхности пористого слоя и стабильную регистрацию электрических характеристик. Высокую надежность и стабильность металлизации поверхности кремния в газочувствительных структурах может обеспечить использование силицидов металлов, которые традиционно применяются в микроэлектронных приборах как ма-

териалы коммутационной разводки, барьерообразующих и омических контактов [4, с. 12—35].

Возможность создания упорядоченных структур при кристаллизации силицидного слоя CoSi₂ на поверхности монокристаллической кремниевой подложки исследовалась в работе [5]. Было обнаружено, что на структурных дефектах поверхности кремния в процессе экзотермической реакции происходит локальное зарождение силицидной фазы и наблюдается ее самоупорядоченный латеральный рост. Перспективность применения силицида кобальта в сенсорных структурах определяется также его высокими физико-химическими свойствами (термостабильность в кислородной среде, соответствие структурным параметрам кремния) и электрическими (отсутствие электромиграции, малые значения поверхностного удельного сопротивления).

В данной работе рассматривается возможность использования процессов силицидообразования для изготовления самоформирующейся сетки металлического электрода на поверхности пористого кремния.