

\*\*\*

Полученные результаты свидетельствуют о том, что НК твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  можно использовать для создания радиационно стойких высокочувствительных сенсоров деформации, работоспособных в сложных условиях эксплуатации (допустимая доза облучения  $\gamma$ -квантами —  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , магнитное поле с индукцией до 4 Тл).

Показано, что НК с удельным сопротивлением  $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  обеспечивают высокую точность измерения деформации ( $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  отн. ед.) при температуре 4,2 К.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дружинин А. О., Островський І. П., Когут Ю. Р. Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів у сенсорній електроніці.— Львів: НУ «Львівська політехніка», 2010.

2. Деклар. пат. на корисну модель 4531. Сенсор температури / А. О. Дружинин, І. П. Островський, Н. С. Лях, С. М. Матвієнко.— 2005.— Бюл. № 1.

3. Дружинин А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М. та ін. Вплив опромінення  $\gamma$ -квантами на властивості ниткоподібних кристалів Si-Ge // Фізика і хімія твердого тіла.— 2010.— Т. 11, № 1.— С. 89—92.

4. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Островський І. П. та ін. Вплив радіаційного опромінення на стрибкову провідність ниткоподібних кристалів Si та Si-Ge // Тези доп. IV Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників.— Україна, м.Запоріжжя, 2009.— Т. 1.— С. 192—193.

5. Шкловский Б. И., Эфрос А. А. Электронные свойства легированных полупроводников.— М.: Наука, 1997.

6. Druzhinin A., Ostrovskiy I., Lavitska E. et al. Studies of piezoresistance in Si-Ge whiskers at cryogenic temperatures // Proc. SPIE.— 2003.— Vol. 5136.— P. 243—248.

Ю. В. УШЕНИН, к. ф.-м. н. А. В. САМОЙЛОВ, Р. В. ХРИСТОСЕНКО

Украина г. Киев, Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарева НАНУ  
E-mail: samoylovanton@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
06.10 2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. А. ЗАХАРЧЕНКО  
(ХФТИ, г. Харьков)

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

*Показано, что использование инфракрасного источника излучения позволяет улучшить чувствительность сенсора по сравнению с источником видимого света.*

Поверхностный плазмонный резонанс (ППР) заключается в оптическом возбуждении плазмонов (или волнообразного изменения плотности заряда) в поверхности, разделяющей проводник (например, серебро или золото) и диэлектрик (это может быть газ, жидкость или твердое тело). Резонансный волновой вектор, связанный с оптическим возбуждением поверхностных плазмонов, зависит от комплексного показателя преломления металла и окружающей диэлектрической среды. Этот рефрактометрический метод с успехом использовался для анализа разнообразных веществ, будь то газы (например, ароматические углеводороды) [1], жидкости (например, токсины в жидкой среде) [2] или твердые тела (например, неорганические твердые частицы [3] и органические пленки Langmuir-Blodgett [4]).

Основным преимуществом поверхностного плазмонного резонанса является то, что он позволяет наблюдать изменения комплексного показателя преломления, которые происходят вблизи поверхности сенсора. То есть, любое физическое явление на поверхности, которое приводит к изменению показателя преломления, может быть использовано для получения отклика измерительной системы.

Для регистрации эффекта ППР используют различные принципы: запись интенсивности отраженного света на полувысоте минимума ППР-кривой [5]; применение конвергирующего светового пучка и координатно-чувствительного регистратора [6]; механическое сканирование угла падения [7], при котором применяют как монохроматический лазерный источник излучения, так и источники немонохроматического излучения [8].

Появление новых модификаций приборов [9] свидетельствует об актуальности направления и наличии достаточно большого количества нерешенных задач, требующих непрерывной модернизации сенсоров такого типа и приспособления их к изменяющимся требованиям к чувствительности, точности измерения, воспроизводимости результатов.

В настоящей работе рассматривается один из возможных способов улучшения чувствительности ППР-преобразователей к изменению показателя преломления исследуемой среды, основанный на применении длинноволновых источников возбуждения ППР.

### Анализ возможности увеличения чувствительности к изменению показателя преломления внешней среды

Основными объектами анализа в настоящей работе служат приборы серии ПЛАЗМОН [10, 11], которые являются универсальными при регистрации ППР в тех случаях, когда в качестве диэлектрика используют жидкости и газы. В них в качестве источника света используется лазерный светоизлучающий диод

с оптической системой формирования коллимированного пучка.

Прибор ПЛАЗМОН-5 может работать в двух режимах. В первом режиме измеряется интенсивность  $I$  отраженного излучения при различных углах падения  $\varphi$  лазерного излучения на систему «призма–золото–диэлектрик». При каких-либо изменениях, происходящих на поверхности золотой пленки, изменяется угловое положение минимума на ППР-кривой  $I(\varphi)$ , которое фиксируется прибором. В ПЛАЗМОНе-5 используется полупроводниковый лазер с длиной волны  $\lambda=650$  нм, диапазон изменения углов падения в воздушной среде составляет  $17^\circ$ , при этом разброс измерений угла составляет около  $10''$ , что позволяет определять изменение показателя преломления на величину  $5 \cdot 10^{-5}$ . Теоретический расчет, проведенный по [12, с. 379—388] с помощью программы Mathcad 13.1, показывает, что при использовании излучения лазера с длиной волны  $\lambda=650$  нм, изменение показателя преломления среды на 0,0001 приводит к смещению углового положения минимума ППР-кривой на  $0,0095^\circ$ , а при  $\lambda=820$  нм — на  $0,0076^\circ$ . То есть, чем больше длина волны, возбуждающей ППР, тем меньше изменяется угловое положение минимума на ППР-кривой при одинаковых изменениях показателя преломления внешней среды. Таким образом, использование волн большей длины в режиме измерения полной ППР-кривой приводит к ухудшению чувствительности прибора, в данном случае — в 1,25 раза.

Во втором режиме работы прибора сначала измеряют полную кривую  $I(\varphi)$  (рис. 1). Затем выбирают рабочую точку на ее спадающей ветви, в соответствии с координатами которой шаговый двигатель при-

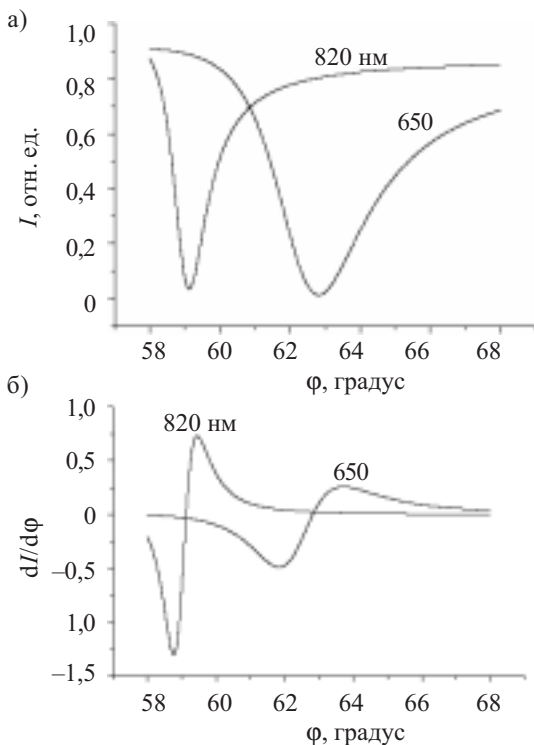


Рис. 1. Зависимость интенсивности  $I$  отраженного излучения (а) и  $dI/d\varphi$  (б) от угла падения на золотую пленку волн возбуждения резонанса разной длины

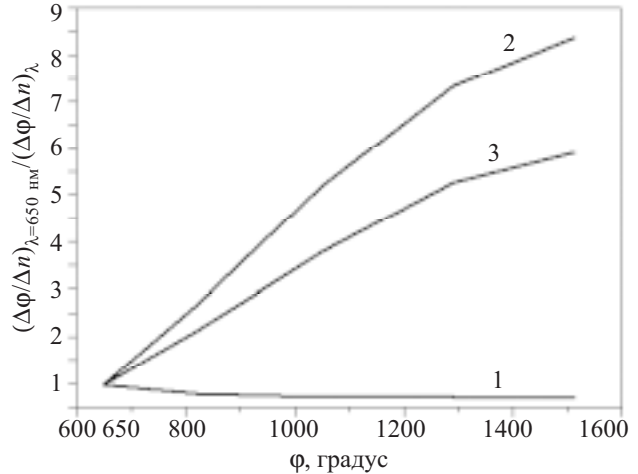


Рис. 2. Изменение чувствительности прибора к изменению  $n$  при  $\lambda=650$  нм с ростом длины волны возбуждения ППР в различных режимах измерения:

1 — первый режим (по изменению углового положения минимума ППР-кривой); 2 — второй режим (по изменению крутизны ППР-кривой); 3 — реальное увеличение чувствительности прибора

бора устанавливает поворотную систему. Далее измеряется интенсивность отраженного излучения при фиксированном угле падения. При изменении оптических свойств среды над поверхностью золотой пленки ППР-кривая смещается, что приводит к перемещению фиксированной по углу падения рабочей точки вдоль ППР-кривой, а значит и к изменению интенсивности отраженного излучения. Таким образом, чувствительность всей системы в этом режиме определяется крутизной спадающей ветви ППР-кривой, т. е. величиной производной  $dI/d\varphi$ . Расчетные ППР-кривые для волн разной длины, а также вид первых производных  $dI/d\varphi$  представлены на рис. 1.

Из рис. 1, б видно, что абсолютное значение максимума производной для  $\lambda=650$  нм равно 0,5 при  $\varphi \approx 62^\circ$ , а для  $\lambda=820$  нм — 1,3 при  $\varphi \approx 59^\circ$ . Это означает, что во втором режиме измерений при  $\lambda=820$  нм за счет изменения формы ППР-кривой (рис. 1, а) можно получить чувствительность к изменению показателя преломления системы в 2,67 раза выше, чем при  $\lambda=650$  нм (рис. 2 кривая 2). Но учитывая то, что при увеличении  $\lambda$  вся кривая сдвигается по углу в 1,25 раза меньше, чем при использовании волн длиной 650 нм (кривая 1), получаем общий коэффициент увеличения чувствительности — 2,14 (кривая 3). Также было рассчитано изменение чувствительности прибора с дальнейшим ростом длины волны. Результаты расчета представлены на рис. 2.

Если для решения конкретной задачи не хватает чувствительности прибора на определенной длине волны, то из графиков на рис. 2 можно оценить целесообразность перехода на другую волну возбуждения плазмонного резонанса.

### Эксперимент

Для проверки теоретических расчетов на базе прибора ПЛАЗМОН-5 с длиной волны возбуждения 650 нм был создан прибор с длиной волны 820 нм. Сенсорный чип представляет собой стеклянную пла-

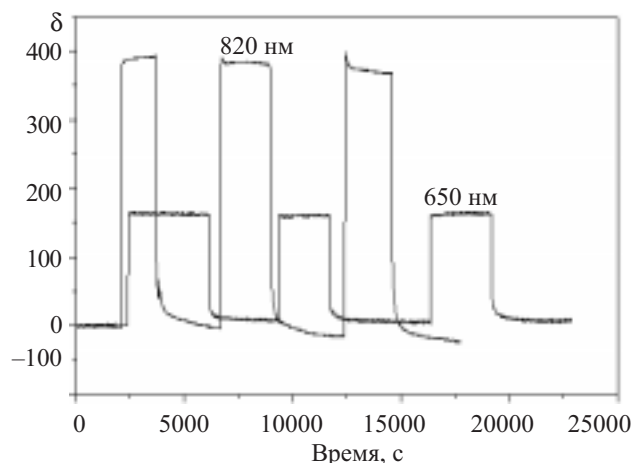


Рис. 3. Экспериментальные кинетические кривые (разность между показаниями прибора в опорном и рабочем каналах) при изменении показателя преломления среды при возбуждении резонанса волнами разной длины

стину размерами 20×20×1 мм с показателем преломления  $n=1,515$ , покрытую слоем золота толщиной 50 нм и подслоем хрома толщиной 3 нм для лучшей адгезии. В ходе эксперимента в кювете, где находился чип, трижды производили замену дистиллированной воды с показателем преломления  $n=1,33303$  на однопроцентный раствор глицерина в дистиллированной воде с  $n=1,33416$ . Режим измерений соответствовал левой ветви ППР-кривой. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

Поскольку прибор имеет два оптических канала — опорный и рабочий, по оси ординат откладывали разность  $\delta$  между показаниями аналогово-цифрового преобразователя на этих каналах. Из рис. 3 видно, что чувствительность к изменению показателя преломления исследуемой среды у прибора с источником излучения волн длиной 820 нм в 2,4 раза выше, чем при  $\lambda=650$  нм.

Полученные результаты неплохо согласуются с проведенными расчетами. Несовпадение расчетного и экспериментального коэффициента увеличения чувствительности связано с различием показателей преломления иммерсионной жидкости, материала призмы и стеклянной подложки, которое не было учтено при теоретических расчетах.

\*\*\*

Переход к большей длине волны возбуждающего ППР излучения увеличивает чувствительность прибора к изменению показателя преломления диэлектрической среды, позволяет изучать более толстые слои диэлектрика над поверхностью золотой пленки, т. к. при этом увеличивается глубина проникновения заужающего электромагнитного поля в диэлектрик. Кроме того, использование излучения с большей длиной волны позволяет работать с материалами, имеющими сильное поглощение в видимой области спектра и прозрачными в ИК-области.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Aguirre N. M., Perez L. M., Colin J. A., Buenrostro-Gonzalez E. Development of a surface plasmon resonance n-dodecane vapor sensor // Sensors.— 2007.— N 7(9).— P. 1954—1961.
2. Gouzya M.-F., Keb M., Kramer P. M. A SPR-based immunosensor for the detection of isoproturon // Biosensors and Bioelectronics.— 2009.— Vol. 24, N 6.— P. 1563—1568.
3. Xu H. and Kall M. Modeling the optical response of nanoparticle-based surface plasmon resonance sensors // Sensors and Actuators. B.— 2002.— Vol. 87, N 2.— P. 244—249.
4. Rella R., Siciliano P., Quaranta F. et al. Gas sensing measurements and analysis of the optical properties of poly[3-(butylthio)thiophene] Langmuir-Blodgett films // Sensors and Actuators. B.— 2000.— Vol. 68.— P. 203—209.
5. Okamoto T., Kamitama T., Yamaguchi I. All-optical spatial light modulator with surface plasmon resonance // Optics Letters.— 1993.— Vol. 18 (18).— P. 1570—1572.
6. Knoll W. Optical characterization of organic thin films and interfaces with evanescent waves // MRS Bulletin.— 1991.— N. 16.— P. 29—39.
7. Dougherty G. A compact optoelectronic instrument with a disposable sensor based on surface plasmon resonance // Meas. Sci. Technol.— 1993.— N 4.— P. 697—699.
8. Hodnik V., Anderluh G. Toxin detection by surface plasmon resonance // Sensors.— 2009.— Vol. 9, N 3.— P. 1339—1354.
9. Shinn-Fwu Wang. A small-displacement sensor using total internal reflection theory and surface plasmon resonance technology for heterodyne interferometry // Sensors.— 2009.— Vol. 9, N 4.— P. 2498—2510.
10. www.isp.kiev.ua
11. Snopok B. A., Kostyukevich K. V., Rengevich O. V. et al. A biosensor approach to probe the structure and function of the adsorbed proteins: fibrinogen at the gold surface // Quantum Electronics and Optoelectronics.— 1991.— Vol. 1, N 1.— P.121—134.
12. Азаам Р., Башара Б. Эллипсометрия и поляризованный свет.— М.: «Мир», 1981.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Рощин В. М., Силибин М. В. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники. Часть 2.— М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010 г.— 184 с.**

Учебное пособие посвящено технологии получения основных компонентов микро-, опто- и наноэлектроники: металлов, легирующих элементов, диэлектрических материалов, углеродных материалов, металлоорганических соединений и вспомогательных материалов. Для студентов, обучающихся по направлению "Электроника и микроэлектроника". Полезно также специалистам, работающим в соответствующей области.

